



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **Katsaus kilpa-ajoneuvojen aerodynamiikkaan eri huippusarjoissa**

Sakari Leponiemi

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2021

# TIIVISTELMÄ

Katsaus kilpa-ajoneuvojen aerodynamiikkaan eri huippusarjoissa

Sakari Leponiemi

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021, 38 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Jussi Salakka

Aerodynamiikan merkitys kilpa-ajoneuvojen suorituskyvyn kannalta on kasvanut jatkuvasti aina 1960-luvulta lähtien. Vuosien varrella onkin kehitetty laaja kirjo erilaisia teknisiä ratkaisuja kilpailullisen edun saavuttamiseksi, kunkin kilpasarjan sääntöjen puitteissa tai niitä kiertäen. Tässä työssä tutustutaan yleisimpien aerodynaamisten ratkaisujen historiaan ja toimintaan helposti lähestyttävällä tasolla. Kilpa-autojen aerodynamiikkaa on sen synnystä alkaen rajoitettu kunkin sarjan säännöillä, yleensä turvallisuuteen nojaten. Ilman näitä rajoituksia autojen suorituskyky olisikin merkittävästi suurempi. Nykyään aerodynamiikan kehittämisen tärkein työkalu on tuulitunnelien sijaan tietokoneavusteinen virtauslaskenta (CFD), jota myös tässä työssä käytetään eri laitteiden toiminnan visualisointiin.

Ensimmäisiä varsinaisia aerodynaamisia apuvälineitä olivat autoihin lisätyt siivet. 1960-luvun lopulla ymmärrettiin negatiivisen nostevoiman eli *downforcen* renkaiden pitoa lisäävä vaikutus, ja siitä alkaen downforcen tuottaminen on ollut olennaisessa roolissa suorituskyvyn kannalta. Erotuksena lentävien laitteiden siipiin, autojen siivet toimivat voimakkaassa *maaepektissä*, ja tämä maanpinnan läheisyyden aiheuttama siipiä tehostava ilmiö on ajanut aerodynamiikan kehitystä aina tähän päivään saakka. Siipien lisäksi on kehitetty muita laitteita, kuten *spoilereita*, *splittereitä* ja *diffuusoreja*, joiden käyttöä säännöt rajoittavat siinä missä siipiäkin.

*Asiasanat: moottoriurheilu, aerodynamiikka, kilpa-auto*

# SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Merkinnät ja lyhenteet

1. Johdanto.....	5
2. Kilpa-ajoneuvot ja aerodynamiikka.....	6
2.1 Aerodynaamisten voimien määrittely.....	6
2.2 Voimien syntymekanismit.....	7
2.3 Aerodynaamisten voimien hyödyt ja haitat.....	9
3. Kilpa-ajoneuvojen aerodynamiikan historiaa.....	13
4. Siivet, spoilerit ja splitterit.....	18
4.1 Johdanto ja määritelmiä.....	18
4.2 Spoilerien ja splitterien toiminta ja käyttö.....	19
4.3 Kilpa-autojen siipien rakenne.....	22
4.4 Siipien toiminta kilpa-autokäytössä.....	26
5. Maaefektilaitteet.....	29
5.1 Maaefektin toiminta.....	29
5.2 Varsinaiset maaefektilaitteet.....	30
6. Yhteenveto.....	37
Lähdeluettelo.....	38

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	poikkipinta-ala
Ci	voimakomponentin kerroin
D	halkaisija
F	voima
l	pituus
M	massa
p	paine
V	nopeus
$\alpha$	siiven ja ilmapinnan kohtauskulma ts. hyökkäyskulma
$\gamma$	kinemaattinen viskositeetti
$\mu$	kitkakerroin
$\rho$	tiheys
ACO	Automobile Club de l'Ouest, ranskalainen autojärjestö, joka hallinnoi mm. Le Mansin 24 tunnin ajoja
Can-Am	Canadian American Challenge Cup, SCCA:n ja FIA:n hallinnoima amerikkalainen kilpasarja vuosilta 1966-1987
F1	FIA:n hallinnoima Formula 1-sarja, Ajettu vuodesta 1950
FIA	Federation Internationale de l'Automobile, autourheilun kansainvälinen kattojärjestö
GT	Grand Touring-kilpa-auto ts. urheiluauto. Katuautoon pohjautuva kilpa-auto, joka on muokattu kunkin sarjan sääntöihin sopivaksi
LMP	Le Mans -Prototyyppiauto
SAE	Society of Automotive Engineers. Yhdysvaltalainen tekniikan standardoimisorganisaatio
SCCA	Sports Car Club of America

# 1. JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tutustutaan kilpa-ajoneuvojen aerodynamiikkaan ja sen merkitykseen ajoneuvon suorituskyvyn kannalta. Työn tarkoituksena on selvittää, millaisia keinoja erilaisten huipputason kilpa-ajoneuvojen aerodynamiikan parantamiseksi käytetään, ja selittää erilaisten aerodynaamisten osien tarkoitusta ja toimintaa.

Kilpa-ajoneuvojen aerodynamiikasta liikkuu paljon väärinkäsityksiä, ja aihetta on vaikea lähestyä aloittelijaystävällisen kirjallisuuden ollessa harvinaista. Tässä työssä pyritään antamaan selkeä yleiskatsaus aerodynamiikan merkityksestä kilpa-ajoneuvoissa sekä erilaisiin teknisiin ratkaisuihin, joita eri kilpa-ajoneuvoissa on historian saatossa tehty aerodynaamisen suorituskyvyn parantamiseksi. Tässä työssä ei tarkastella läheisesti ajoneuvojen aerodynamiikkaan liittyvää fysiikkaa, sillä ilmiöiden monimutkaisuuden ja matemaattisen luonteen vuoksi työstä tulisi helposti tarpeettoman laaja ja hankalasti lähestyttävä. Sen sijaan kilpa-ajoneuvoista kiinnostuneille tämä kandidaatintyö voi olla hyvä tapa tutustua ajoneuvojen aerodynamiikkaan.

Kilpa-ajoneuvojen aerodynaamisesti tärkein tavoite on kehittää mahdollisimman paljon negatiivista nostevoimaa eli *downforcea* ja mahdollisimman vähän ilmanvastusvoimaa (Zhang et al. 2006). Ilmanvastuksen on tiedetty jo 1900-luvun alusta alkaen rajoittavan auton suorituskykyä, ja aluksi autojen suunnittelijat pyrkivätkin virtaviivaistamaan muotoja ja vähentämään ilmanvastusta. Vasta 1960-luvun lopulla ymmärrettiin, että aerodynamiikan avulla voidaan lisätä normaalivoimaa ajoneuvon renkailla, ja siten huomattavasti lisätä ajoneuvon suorituskykyä etenkin kaarreaajossa. Nykyään aerodynamiikan hyödyntäminen on tehnyt kilpa-autoista niin paljon nopeampia, että eri kilpasarjojen järjestävät tahot ovat joutuneet laatimaan uusia sääntöjä ja kieltämään paljon tässäkin työssä esiteltäviä teknisiä ratkaisuja, jotteivät nopeudet kasvaisi liian vaarallisiksi. (McBeath 2015, s. 9) Aerodynamiikan voidaankin sanoa tänä päivänä olevan eniten kilpa-ajoneuvon suorituskykyä määrittävä tekijä useimmissa eri huippusarjoissa.

## 2. KILPA-AJONEUVOT JA AERODYNAMIikka

### 2.1 Aerodynaamisten voimien määrittely

Kilpa-ajoneuvot, kuten kaikki muutkin kulkuvälineet avaruusaluksia lukuunottamatta liikkuvat maan ilmakehässä ja kehittävät siten aina aerodynaamisia voimia. Lentokoneiden tapauksessa nämä voimat, etenkin ylöspäin suuntautuva voimakomponentti eli *noste* (eng. *lift*), ovat edellytys koneen toiminnalle, mutta autoilla ei toiminnan kannalta tällaista vaatimusta ole. Nosteen merkitys autojen ja etenkin kilpa-autojen suorituskyvyn parantamisessa ymmärrettiinkin historiallisesta näkökulmasta katsottuna verrattain myöhään, vasta toisen maailmansodan jälkeisenä aikana (Milliken 1995, s. 490).

Ajoneuvon liikkeen kanssa vastakkaissuuntainen voimakomponentti eli *ilmanvastus* (eng. *drag*) sen sijaan on helposti huomattavissa myös aistihavainnoilla esimerkiksi polkupyörällä ajettaessa. Ilmanvastuksen merkitys ajoneuvojen suorituskykyä rajoittavana tekijänä onkin tunnettu jo pitkään, ja ensimmäiset aerodynaamisesti suunnitellut autot valmistettiin jo 1800-luvun lopussa (Hucho 1987, s. 12)! Pyöräillessä on helppo havaita sopivalla tuulella myös *sivuvoima* (eng. *sideforce*), joka vaikuttaa ajoneuvon sivusuunnassa. Sivuvoimat tosin jätetään usein huomiotta dynaamisen luonteensa ja yleensä vähäisen suuruutensa vuoksi (McBeath 2015, s. 34; Katz 2005, s. 3).

Nämä edellä kuvatut voimat vaikuttavat ajoneuvoon sen pinnalla pintavoimina, joilla on tietty jakauma. Yleensä voimat kuitenkin kuvataan yleensä pistevoimina, jotka vaikuttavat todellisen voiman paineakeskiöön. Nämä pistevoimat aiheuttavat luonnollisesti kukin momentin ajoneuvon sovittujen koordinaattiakselien ympäri. Tällä tavoin määritellyt *aerodynaamiset voimat ja momentit* ovat yleisessä käytössä, ja ne on standardoitu SAE:n standardiin (Milliken ja Milliken 1995, s. 109; SAE J 1594, 1984).

Aerodynaamiset voimat kasvavat verrannollisesti virtausnopeuden neliöön, ja ovat siksi korkeilla nopeuksilla erittäin suuria. Käytännön syistä voimia kuvataan usein dimensiottomien kertoimien, yleisesti *ilmanvastukertoimen*, avulla. Voimia kuvataan yleensä yhtälöllä (1)

$$F_i = C_i A \rho V^2 / 2, \quad (1)$$

missä  $F_i$  on voimakomponentti [N],  
 $C_i$  on voimakomponentin kerroin,  
 $A$  on ajoneuvon otsapinta-ala [m<sup>2</sup>],  
 $\rho$  on ilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>] ja  
 $V$  on ajoneuvon nopeus [m/s].

Ajoneuvon otsapinta-ala määritellään sen projektiona 2D-tasolle edestäpäin kuvattuna, tosin pinta-alan joskus vaikean laskemisen vuoksi monesti käytetään sen sijaan niin sanottua *referenssialaa* (eng. *reference area*), joka on joko mielivaltainen tai karkea arvio auton otsapinta-alasta (Milliken ja Milliken 1995, s. 110). Tämä määritelmä eroaa *siipien* voimakertoimien määrittelyssä käytettävästä pinta-alasta, joka on siiven ”yläpuolelta” kuvattu ala, eng. *plan area* (McBeath 2015, s. 35; Zhang et al. 2006). Vastus- ja nostekertoimien lisäksi tärkeä aerodynaamisen suorituskyvyn tunnusluku on noste- ja vastuskertoimen suhde eli siiven *hyötysuhde* (eng. *lift-to-drag ratio*).

## 2.2 Voimien syntymekanismit

Kaikki väliaineessa liikkuvat kappaleet kehittävät virtausdynaamisia voimia nopeutensa funktiona. Voimat voidaan huomattavasti äänen nopeutta matalammilla nopeuksilla, kuten kilpa-auton < 400 kilometrin tuntivauhdeissa, jakaa syntymekanisminsa puolesta jakaa kahteen ryhmään: *kitkavoimiin* ja *painevoimiin*.

Kitkavoimat ovat väliaineen viskositeetista johtuvia, kappaleen pinnan *tangentin* suuntaisia voimia, jotka syntyvät koska väliaineen nopeus kappaleen pinnalla on kitkan vaikutuksesta sama kuin kappaleella itsellään (eng. *no-slip condition*). Väliaineeseen ja sen suhteen liikkuvaan kappaleeseen muodostuu sitä kautta leikkausvoima paikallista virtauksen suuntaa vastaan. Kitkavoimat vaikuttavat vain ilmanvastukseen, voimistaen sitä. Ilman vähäisen viskositeetin, ja kilpa-autojen suhteellisen pienen pinta-alan vuoksi kitkavoimat ovat yleensä hyvin vähäisiä autoja tarkastellessa, ja niiden vaikutus ilmanvastuskertoimeen on tyypillisesti luokkaa < 0.05. (Katz 2005, s. 25-59)

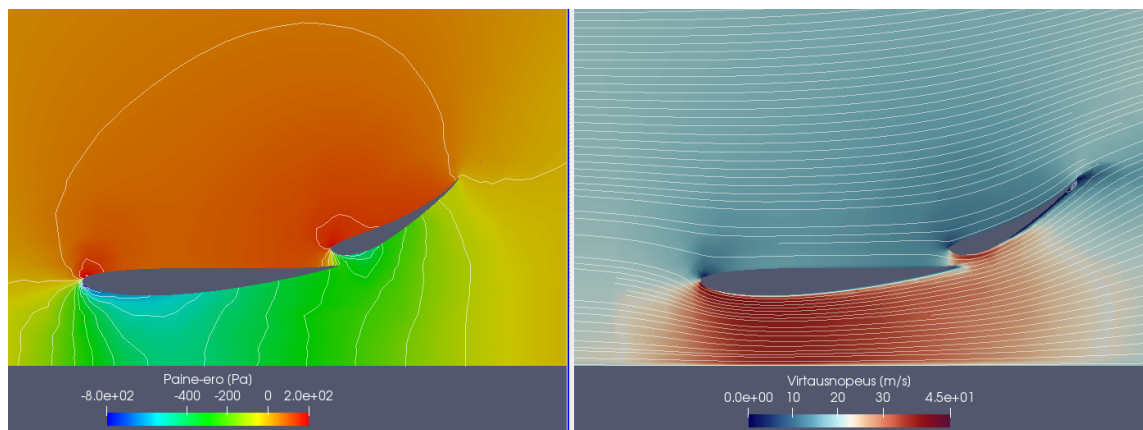
Painevoimat ovat autojen kannalta merkityksellisempiä. Ne kehittävät autojen ja lentokoneiden nosteen ja suurimman osan autojen ilmanvastuksesta. Painevoimat

syntyvät energian ja liikemäärän säilymlakien pohjalta, ja niitä kuvataan yleisesti Bernoullin yhtälön

$$p_{\text{tot}} = p + \rho \cdot v^2 / 2, \quad (2)$$

missä  $p_{\text{tot}}$  on systeemin kokonaispaine,  
 $\rho$  on väliaineen tiheys,  
 $p$  on vallitseva *staattinen* paine ja  
 $v$  on virtauksen nopeus

avulla. Yhtälö liittää virtausnopeuden ja paineen toisiinsa siten, että virtausnopeuden suhteellinen kasvu laskee vallitsevaa staattista painetta siten, että vallitseva *kokonaispaine* säilyy vakiona. Tämän yhteyden ansiosta kaareva siipi tuottaa nostetta, sillä se kasvattaa virtausnopeutta toisella puolellaan ja hidastaa sitä toisella, aiheuttaen paine-eron josta sitten syntyy painevoima suhteessa siiven pinta-alaan. Tämä virtausnopeuden ja paineen kääntäen verrannollinen suhde on selvästi nähtävillä kuvassa 1. Nostetta kehitettäessä tärkein tavoite onkin paikallisen virtausnopeuseron ja sitä kautta paine-eron maksimointi. *Siipi* on yleisin tapa luoda painevoimia virtauksesta, ja siipiprofiileja onkin tutkittu ja standardoitu laajasti jo 1900-luvun alusta alkaen.



Kuva 1. Paine- ja virtauskenttä kaksielementtisen siiven ympärillä.

Virtausnopeuseroja ja sitä kautta painevoimia luodaan väliaineessa liikkuvan kappaleen geometrian avulla. Viskoosi väliaine, kuten ilma, myötäilee virratessaan kappaleen muotoja ja virtaus voidaan sitä kautta ”pakottaa” kulkemaan haluttua reittiä. Kitkavoimien vaikutuksesta kappaleen pinnan läheisyyteen muodostuu virtaukseen rajakerros, jonka vapaavirtaan nähden hitaampi virtausnopeus luo virtaan leikkausjännityksiä, jotka taittavat virran kappaleen muotoon. Kuitenkin, virtauksen



suuntaa ei voida muuttaa mielivaltaisesti, sillä liian jyrkän kaarevuuden, pinnan epätasaisuuksien, kasvavan paineen tai näiden yhdistelmän johdosta virtaus saattaa *irrota* kappaleen pinnalta. Virtauksen irtoaminen, eli *sakkaaminen*, voi johtaa vallitsevan virtaustilan romahtamiseen ja sitä kautta painevoimien muuttumiseen hallitsemattomiksi. Virtauksen irtoaminen on hyvin monimutkainen ilmiö, ja se muodostaa rajoittavan tekijän siipien, lentokoneiden ja myös autojen aerodynaamiselle suorituskyyvylle. Irtoamiseen voidaan vaikuttaa erilaisin keinoin, kuten pinnankarheuden tai virtauksen pyörteiden avulla, ja tämä tutkimusala kehittyy edelleen nopeasti mm. parempien mallinnus- ja laskentamenetelmien myötä. (Milliken ja Milliken, 1995, s. 83-99; Shan et al., 2008)

## 2.3 Aerodynaamisten voimien hyödyt ja haitat

Millikenin ja Millikenin (1995, s. 3-11) mukaan kilpa-autojen suunnittelussa tärkein tehtävä on kilpasarjan sääntöjä noudattaen luoda auto, joka kykenee ajamaan määrätyn radan mahdollisimman nopeasti. Edelleen, ajoneuvo joka kehittää suurimman kiihtyvyyden oikeaan suuntaan oikeaan aikaan radan ympäri ajaessaan selvittää radan nopeiten. Rata-ajaminen voidaankin jakaa kiihtyvyyden suunnan mukaan osiin: jarrutuksiin, suoriin ja kaarteisiin. Ajoneuvon kiihtyvyyttä kuvaa luonnollisesti Newtonin II laki

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}, \tag{3}$$

missä  $\mathbf{F}$  on kappaleeseen vaikuttava kokonaisvoima [N],  
 $m$  on ajoneuvon massa [kg] ja  
 $\mathbf{a}$  on ajoneuvon kiihtyvyys [ $\text{m/s}^2$ ].

Suurin kiihtyvyys siis saavutetaan, kun ajoneuvoon saadaan kohdistettua suurin mahdollinen ulkoinen voima, ja kun ajoneuvon massa on mahdollisimman matala. Kilpa-auton tapauksessa kaikki ulkoiset voimat syntyvät joko renkaiden kitkan kautta tai aerodynamiikasta (Milliken ja Milliken 1995, s. 83). Aerodynaamisista voimista vain ilmanvastus vaikuttaa suoraan ajoneuvon suorituskyykyyn, ja sekin heikentävästi. Sivuvoimat ja noste vaikuttavat merkittävästi ajoneuvon renkaiden kautta, sivuvoimat etenkin ajovakauteen ja noste renkaiden ylipäättänsä kehittämään kitkavoimaan.

Ajoneuvon renkaiden kehittämän kitkavoiman maksimi riippuu monista tekijöistä, mutta sitä voidaan kuvata yksinkertaistetusti Coulombin kitkalain avulla

$$F = \mu R, \quad (4)$$

missä  $F$  on renkaan kehittämä voima [N],  
 $\mu$  on renkaan kitkakerroin, ja  
 $R$  on renkaaseen vaikuttava normaalivoima [N].

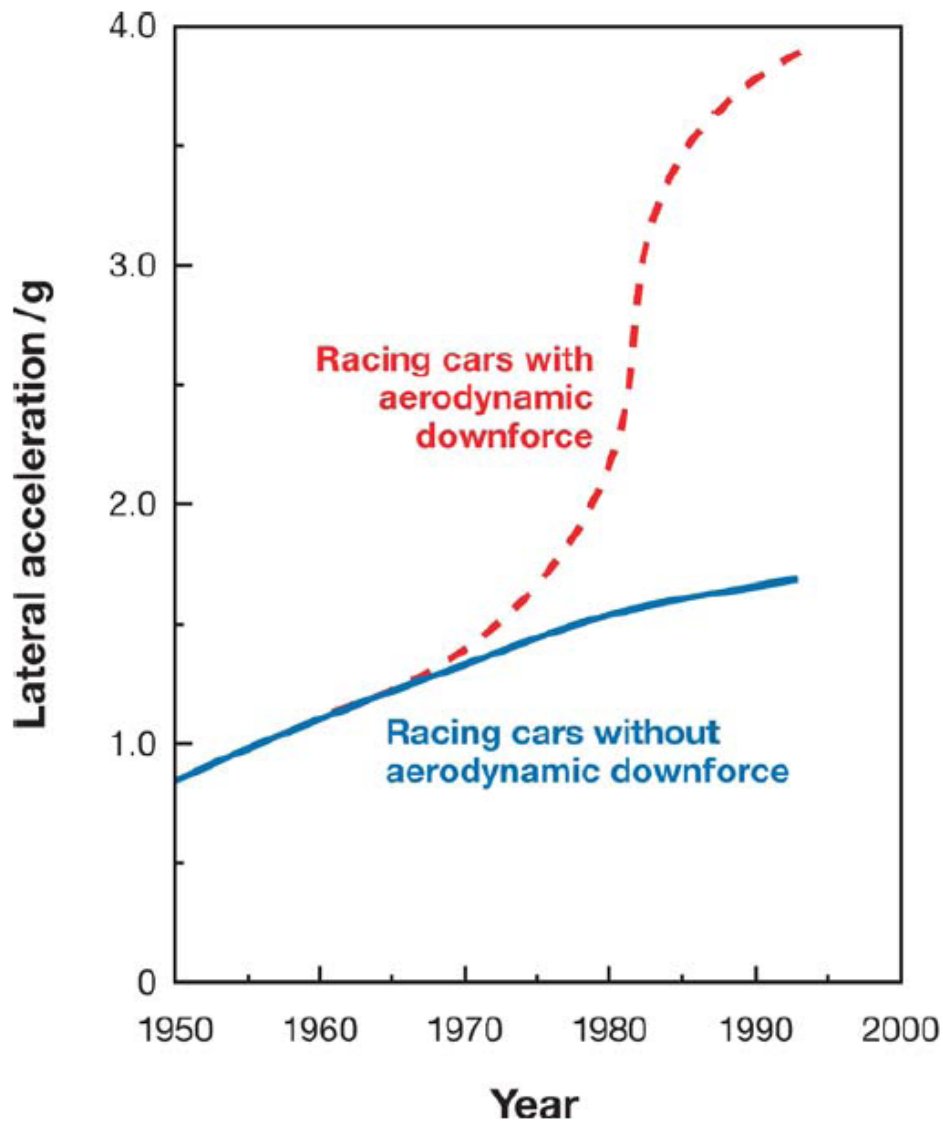
Ottamatta huomioon kiihtyvyyksien aiheuttamia momenttivaikutuksia tai aerodynaamisia voimia, vaikuttava normaalivoima on ajoneuvon paino kullekin renkaalle, ja kasvattamalla normaalivoimaa renkailla voidaan kasvattaa saavutettuja kiihtyvyyksiä (McBeath 2015, s. 41). Kuten yhtälöstä 2 voidaan päätellä, nostamalla ajoneuvon massaa ei kuitenkaan saavuteta suurempaa maksimikiihtyvyyttä, sillä kiihdytettävä massa kasvaa samassa suhteessa renkaan kehittämän voiman kanssa.

Negatiivisen aerodynaamisen nosteen eli *downforcen* avulla voidaan kasvattaa renkaiden kehittämiä voimia nostamatta auton massaa, ja siten parantaa ajoneuvon suorituskykyä merkittävästi. Zhangin et al. (2006) mukaan auton maksimikiihtyvyyttä voidaanakin paremmin kuvata

$$a = g\mu_{\max} + \mu_{\max} F_{df} / M, \quad (5)$$

missä  $a$  on ajoneuvon kiihtyvyys [ $\text{m/s}^2$ ],  
 $\mu$  on renkaan kitkakerroin,  
 $F_{df}$  on auton kehittämä negatiivinen nostevoima [N], ja  
 $M$  on kiihdytettävä massa.

Edellä kuvattu maksimikiihtyvyyden riippuvuus renkaan kitkakertoimesta pitää paikkansa vain, kun renkaan kitka on kiihtyvyyttä rajoittava tekijä, toisin sanoen vain jarrutuksen ja kaarreajon tilanteissa, joissa kuljettaja ajaa renkaiden pidon rajoilla. Moottorin kehittämä työntövoima ei yleensä suoralla riitä ylittämään vetävien renkaiden kitkaa paitsi pienissä nopeuksissa, joten downforcen osuus suoralla kiihdytykseen on vähäinen. (McBeath 2015 s. 42)



Kuva 2. Kilpa-autojen tyypillisiä maksimisivuttaiskiihtyvyyksiä eri vuosilta (Katz 2006).

Aerodynaamisen downforcen merkitystä on helppo kuvata tutkimalla huippusarjojen autoilla saavutettuja sivuttaiskiihtyvyyksiä vuosien varrelta. Kuvassa 2 on koottu kuninkuusluokkien kilpa-autojen sivuttaiskiihtyvyyksiä historiallisesta näkökulmasta. Aerodynamiikan yleistyminen 1970-luvulla on johtanut sivuttaiskiihtyvyyksien moninkertaistumiseen ja sitä kautta kierrosaikojen huimaan laskuun, jota viime vuosikymmeninä on sääntöjen keinoin alettu rajoittaa.

Downforcesta poiketen ilmanvastusvoima vaikuttaa ajoneuvon suorituskykyyn negatiivisesti, ennen kaikkea vähentämällä huippunopeutta. Suurissa nopeuksissa ilmanvastusvoima kasvaa nimittäin hyvin suureksi, ja jo 70 kilometrin tuntinopeudessa

se voi muodostaa yli kaksi kolmannesta kaikista ajovastusvoimista (Leduc 2009). Kuitenkin, huippunopeus suorilla on yleensä merkitykseltään kierrosajan suhteen paljon vähäisempi kuin kaarreaajotilanteet, joten lähes aina downforcen lisääminen vaikka ilmanvastuksen kustannuksella parantaa ajoneuvon kokonaissuorituskykyä (McBeath 2015 s. 41).

### 3. KILPA-AJONEUVOJEN AERODYNAMIIKAN HISTORIAA

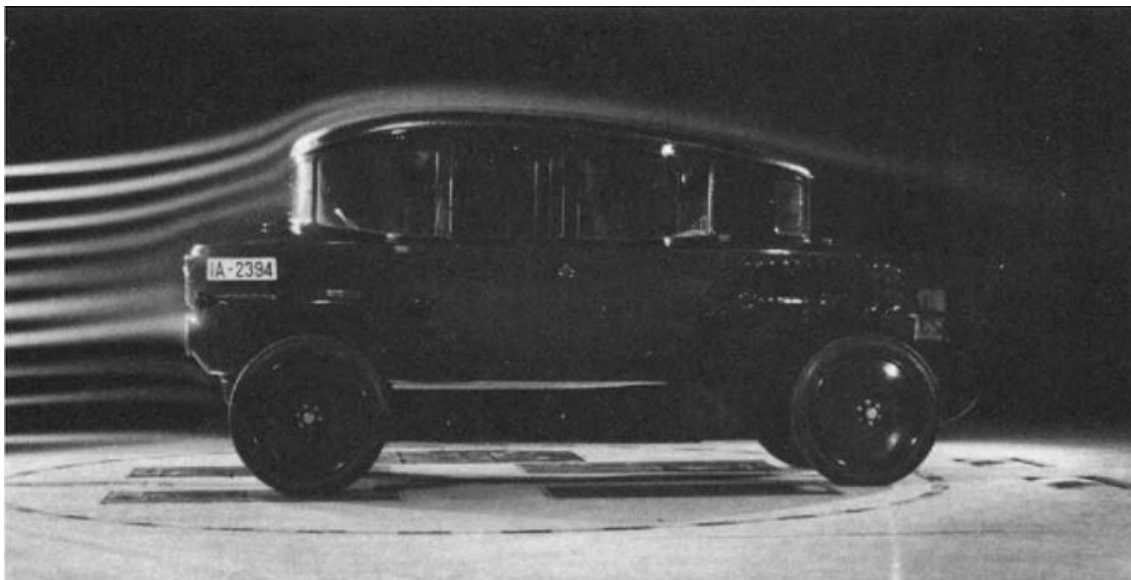
1800- ja 1900 luvun taitteessa, kun hevoscärriä suuremman suorituskyvyn omaavia autoja rakennettiin ensi kertaa, aerodynamiikan merkitys otettiin huomioon lähinnä *virtaviivaistamalla* auton muotoilua esimerkiksi ilmalaivojen tapaan. Kuvassa 3 esitetty nopeusennätysauto vuodelta 1899 kertoo selvästi, että ilmanvastus tunnettiin hyvin jo tuohon aikaan. Huonojen teiden ja hyvin matalien moottoritehojen vuoksi nopeudet jäivät kuitenkin aina niin pieniksi, ettei aerodynaamisella suunnittelulla juuri saavutettu ulkonäköä suurempaa hyötyä.



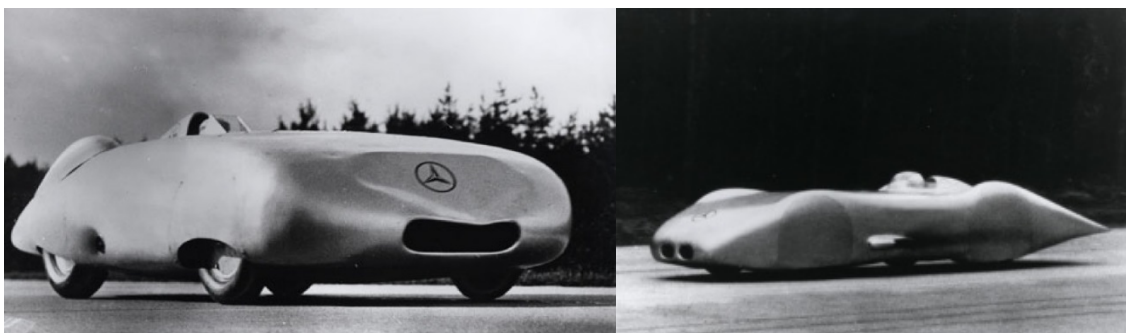
Kuva 3. Camille Jenatzyn nopeusennätysauto vuodelta 1899 (Wikimedia Commons, luettu 12.12.2017).

Ensimmäisen maailmansodan jälkeen, moottori- ja ilmailutekniikan kehittyttyä merkittävästi, autojen aerodynamiikkaa alettiin ensi kertaa tutkia järjestelmällisesti. Tuolloin ymmärrettiin ensi kertaa renkaiden ja maan pinnan läheisyyden dominoiva merkitys auton aerodynamiikan kokonaisuuden kannalta. Kuvassa 4 nähdään niin sanottu ”pisara-auto” (saks. Tropfenwagen) vuodelta 1924. Auto on testattu modernissa tuulitunnelissa ja sen ilmanvastuskertoimeksi mitattiin nykyäänkin erinomainen 0.28

(Hucho 1998, Katzin 2006 s. 28 mukaan)! Vielä ei tosin ymmärretty ilmanvastuksen lisäksi muiden voimakomponenttien merkitystä ajoneuvon suorituskyvyn kannalta, ja aerodynamiikalla saavutetut edut olivat vähäisiä verrattuna esimerkiksi renkaiden, jousituksen ja moottorien kehittämisestä saavutettuihin nähden. (Hucho 1987, s. 9-23; McBeath 2015, s. 8)



Kuva 4. 1924 Rumpler Tropfenwagen (Wikimedia Commons, luettu 12.12.2017).



Kuva 5. Mercedes-Benz–nopeustestiautoja vuosilta 1936-1939 (Daimler Media, luettu 12.12.2017).

Autojen kehittämän nosteen vaikutus ajamiseen havaittiin ensi kertaa sotien välisenä aikana. Opel asensi raketikäyttöiseen autoonsa vakauttavat siivet jo vuonna 1929, tosin tämä idea ”unohdettiin” sen jälkeen 30 vuodeksi (Hucho 1998, Katzin 2006 s. 28 mukaan). Daimler-Benzin muun muassa kuvassa 5 esitetyillä ajoneuvoilla suorittamissa suurnopeuskokeissa vuosina 1936-1939 kuljettajat havaitsivat ohjauksen kevenevän

suurissa nopeuksissa, ja noin 400 kilometrin tuntinopeudessa sivustakatsojat kertoivat eturenkaiden nousevan kokonaan irti tiestä (Milliken ja Milliken, 1995, s. 490). . Autojen ilmanvastuskerroin oli alle 0.2 ja moottoriteho jopa 2000 kW, 44.5-litraisen lentokonemoottorin ansiosta. Jos toinen maailmansota ei olisi syttynyt ja katkaissut autojen kehitystä, olisi 700 kilometrin tuntinopeus todennäköisesti saavutettu.



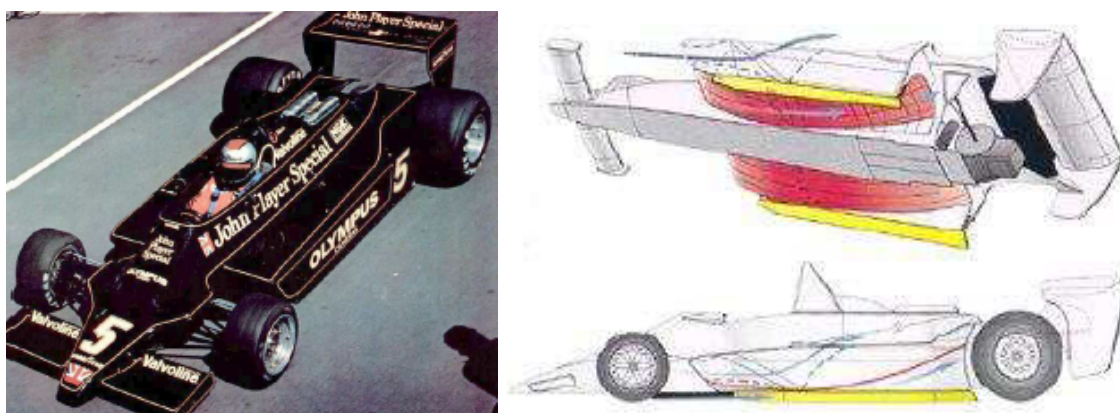
Kuva 6. 1967 Chaparral 2E (Wikimedia Commons, luettu 12.12.2017).

Toisen maailmansodan jälkeen nosteen merkitys tunnettiin paremmin, ja sitä alettiin mitata kilpa-autoissa. ”Ilmapatoja” ja spoilereita kehitettiin minimoimaan nostetta urheiluautoissa ja Can-Am autoissa 1960-luvun alusta alkaen. Tällaisilla apuvälineillä voitiin vähentää auton tuottamaa nostetta jonkin verran, mutta varsinainen aerodynaaminen vallankumous alkoi vuonna 1966, kun General Motors Companyn tukemaan Chaparral 2C autoon asennettiin *takasiipi*. Kuvassa 6 esitetty auto oli ajalleen tyypillinen, mutta siipi oli mekaanisesti hyvin edistysellinen: kuljettaja pystyi säätämään sen hyökkäyskulmaa ajon aikana jalalla käytettävällä vivulla ja se välitti kehittämänsä voimat suoraan ajoneuvon takarenkaille rungon sijaan. Siiven lisäksi auton nokan alla oli samalla vivulla säädettävä spoileri tasapainon säilyttämiseksi. Aerodynaamisesti siipi oli toki yksinkertainen yksielementtinen lähes symmetrinen profiili, mutta siltikin sillä saavutetut hyödyt olivat niin merkittäviä, että jo vuodesta



1968 siivet olivat tärkeä osa etenkin avorenkaisia Formula 1-autoja, ja sääntöjä laativat tahot alkoivat välittömästi rajoittaa siipien käyttöä turvallisuuteen vedoten. (Milliken ja Milliken 1995, s. 490-511; Falconer ja Nye 1992, Katzin 2006 s. 28 mukaan)

Vuonna 1970 Chaparral Can-Am-sarjassa ja Brabham F1-sarjassa kokeilivat moottorilla käytettyjä tuulettimia alipaineen luomiseksi auton pohjan alle. Vaikka alipaine itsessään oli pieni, ajoneuvon pohjan suuri pinta-ala johti suureen negatiiviseen nostevoimaan. Hyvistä tuloksista huolimatta tällaiset ratkaisut kiellettiin nopeasti turvallisuuden nojalla, sillä autot puhalsivat myös kaikki auton alta löytyneet kivet ja muut kappaleet takana ajavien päälle. (Milliken ja Milliken 1995, s. 491; McBeath 2015, s. 11-12).



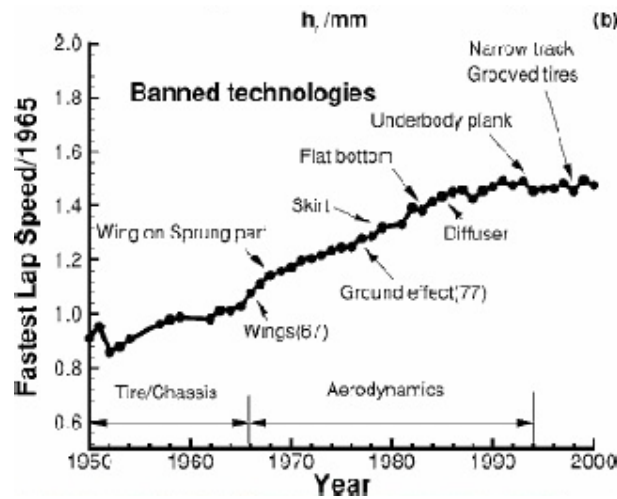
Kuva 7. 1979 Lotus 79 (Wikimedia Commons, luettu 12.12.2017).

Viimeinen merkittävä keksintö oli niin kutsutun *maaefektin* hyödyntäminen. Nopeasti ulkoisten siipien ensiesiintymisen jälkeen ymmärrettiin, että ajoneuvon rungon voisi myös muotoilla siiven muotoon. Lotuksen F1-talli testasi vuonna 1975 maanpinnan ja alapinnaltaan siiven muotoisten sivuponttoonien välin sulkevia helmoja, jotka myötäilivät maanpintaa ja siten eristivät rungon alapinnan sivultapäin. Tulokset olivat huikeita; nostevoima kasvoi olennaisesti ilmanvastuksen juuri muuttumatta. Kuvassa 7 näkyvä auto voittikin kuljettajien ja valmistajien F1-mestaruuden vuonna 1978! Auton rungon, tarkasti muotoiltujen sivuponttoonien ja eristävien helmojen kokonaisuutta nimitetään *tunneleiksi* tai *Venturi-tunneleiksi*, ja niiden keksimisestä käynnistyi maaefektin järjestelmällinen tutkiminen ja hyödyntäminen. (McBeath 2015, s. 146-450).

Kuten tuulettimilla tuotetun nosteen tapauksessa, sääntöjä luovat tahot, F1-sarjaa hallinnoiva FIA etunenässä, kielsivät ensin maata viistävät helmat ja sen jälkeen tunneleiksi muotoillun rungon lähes kaikissa kilpasarjoissa. Yhä tänäkin päivänä käytännössä kaikki kuningasluokkien autot Indycar-sarjaa lukuunottamatta on varustettu



sääntöjen pakottamana tasaisella tai yksinkertaisesti profiloidulla pohjalevyllä. Autojen suorituskyky on kehittynyt edelleen kilpailun pakottaman kehitystyön myötä, mutta on selvää, että huippusarjojen autojen suorituskykyä rajoittavat tänä päivänä säännöt tekniikan sijaan. Kuvassa 8 on koottu sääntöuudistusten vaikutusta F1-sarjan kierrosaikoihin 1950-luvulta 2000-luvun alkuun, jolloin kyseisen sarjan suorituskyky saavutti historiallisen huippunsa.



Kuva 8. F1-sarjan kierrosaikojen historiallinen kehitys aerodynaamisten sääntöuudistusten valossa (Zhang et al. 2006).

## 4. SIIVET, SPOILERIT JA SPLITTERIT

### 4.1 Johdanto ja määritelmiä

Kuten aiemmin todettiin, autojen aerodynaamisen suorituskyvyn parantaminen on ollut suunnittelijoiden tavoitteena jo 1900-luvun alussa. Kuitenkin, rungon virtaviivaistamisen lisäksi ensimmäiset vain aerodynaamiikan vuoksi autoihin asennetut osat ilmestyivät vasta toisen maailmansodan jälkeen, ja ensimmäisenä urheiluautoihin pohjautuviin kilpa-autoihin avorenkaisten Formula-autojen sijaan (McBeath 2015, s. 59-60). Nämä osat olivat *spoilereita* (eng. *spoiler*), ja niitä käytetään kilpa-autoissa ja urheiluautoissa edelleen.



Kuva 9. Katumalliin pohjautuva ACO:n GTLM-sarjan auto vuodelta 2017: Porsche 911RSR (Porsche USA, luettu 23.3.2018).

Arkikielessä termejä splitteri, spoileri ja siipi käytetään autojen yhteydessä usein toistensa synonyymeinä, eikä näille laitteille olekaan yleisesti käytössä olevia yksikäsitteisiä määritelmiä. McBeath (2015) määrittelee *spoilerin* ajoneuvon etu- tai takaosassa **pystysuorana tai melkein pystysuorana**, jäykkänä levymäisenä rakenteena, joka on joko integroitu ajoneuvon muotoiluun tai lisätty jälkikäteen. *Splitteri* puolestaan on yleensä ajoneuvon keulan alaosaan sijoitettu **vaakasuuntainen** levymäinen rakenne, joka kehittyi keulaspoilerien lisälaitteeksi vuosien varrella. Avopyöräisissä autoissa, kuten F1-autoissa käytetään usein splitterejä myös ajoneuvon keskellä, ohjaamon alapuolella. Katuautoihin pohjautuvissa kilpa-autoissa, kuten kuvassa 9 esitetyssä ACO:n GTLM-sarjan Porsche 911RSR:ssä, käytetään usein sekä etuspoileria että

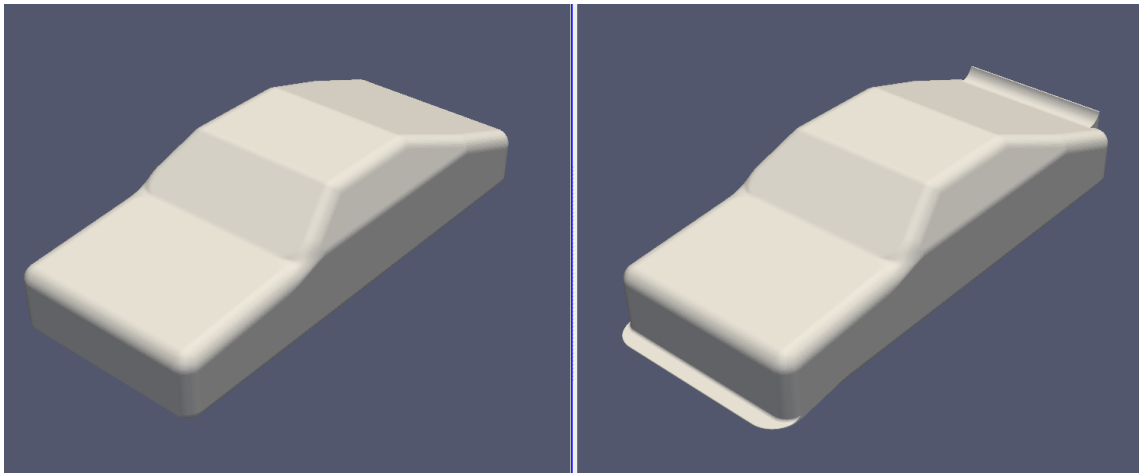
splitteriä, ja lisäksi myös takana on yleensä spoileri. Kuvassa auton keulalla nähdäänkin suuri spoileri ja splitteri siivekkeillä höystettynä, ja takasiiven alta löytyy toinen spoileri.

*Siipi* voidaan kilpa-autojen yhteydessä määritellä yksikäsitteisesti aerodynaamisena laitteena joka on sijoitettu erilliseksi auton varsinaisesta rungosta (McBeath, 2015, s. 79-80 ). Yleisesti siivistä puhuttaessa käytetään myös sijoittelun mukaan etu- ja takasiiven lisämääritteitä. Spoilerien, splitterien ja siipien tarkka geometria vaihtelee voimakkaasti käyttökohteen mukaan, joten yleispätevän, yksikäsitteisen määrittelyn luominen on hankalaa.

## 4.2 Spoilerien ja splitterien toiminta ja käyttö

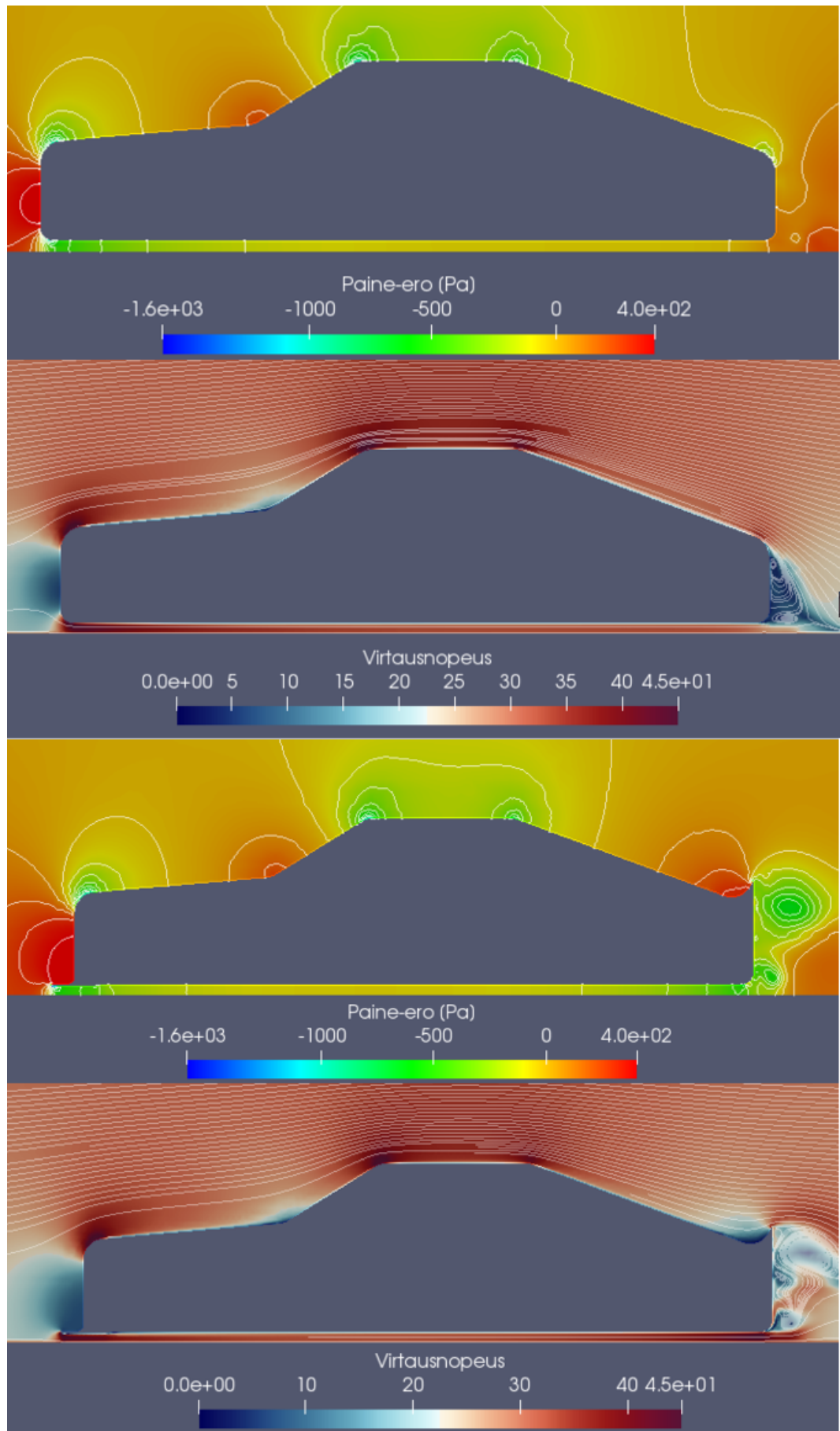
Spoilerit olivat ensimmäisiä autoissa nosteen vähentämiseen käytettyjä laitteita, sillä niiden käyttö aloitettiin jo 1960-luvun alussa nopeissa Le Mansin 24 tunnin ajojen autoissa, samoin kuin Yhdysvalloissa ovaalirata-ajoissa (McBeath 2015, s. 59). McBeathin (2015) mukaan spoilerien toiminta perustuu ilmavirran pysäyttämiseen spoilerin edessä ja takana. Tämä johtaa Bernoullin lain mukaisesti paineen nousuun spoilerin edessä jolloin takaspoileri voi tuottaa negatiivista nostetta *staattisen* paineen kasvaessa auton perän päällä. Etuspoilerin toiminta on hieman monimutkaisempaa, sillä se perustuu virtauksen pysähtymiseen spoilerin takana. Virtauksen pysähtyminen johtaa *kokonaispaineen* laskuun, joka laskee myös staattista painetta johtaen paine-eroon ajoneuvon keulan ylä- ja alapinnan välillä. Spoilerin edessä vallitsevan korkean paineen vuoksi spoilerin *ohittava* virtaus voimistuu, ja tätä virtausta voidaan hyödyntää splitterin avulla.

Splitteri auton keulan alla antaa keulan edessä vallitsevaa korkeapainealuetta väistävälle ilmavirralle reitin auton keulan alle. Toki ilma virtaa keulan alle ilmankin splitteriä, mutta splitterin avulla keulan alle suurella nopeudella liikkuvan ilmavirran luoma matala staattisen paineen alue muodostaa voimakkaan paine-eron vaakasuoran splitterin päälle ja alle, jolloin syntyy nostetta ilmanvastuksen juurikaan kasvamatta. Paine-eroa kasvattaa edelleen spoilerin voimistama ilmavirran pysähtyminen ajoneuvon edessä splitterin päällä. Splitteri onkin hyvin tehokas laite luomaan negatiivista nostetta kilpa-auton keulalle ilman suurta ilmanvastushaittaa, kuten taulukosta 1 voidaan nähdä.



Kuva 10. CFD-analyysissä käytetty yksinkertaistettu auton runkomalli ja siihen lisätty splitteri ja spoileri.

Kuvassa 11 on havainnollistettu kuvan 10 mukaisen yksinkertaisen takaspoilerin ja etusplitterin toimintaa yksinkertaistetun auton runkomallin ja CFD-analyysin avulla. Analyysin helpottamiseksi mallin pohja ja kaikki pinnat ovat tasaisia ja nurkat pyöristettyjä, eikä mallissa käytetty lainkaan renkaita, joten malli ei vastaa todellisia autoja. Splitterin ja spoilerin toimintaa voidaan kuitenkin kuvata näinkin yksinkertaisella mallilla ainakin havainnollistamisen tasolle.



Kuva 11. Paine- ja virtausnopeuskentät malliauton ympärillä ilman lisälaitteita ja lisätyllä etusplitterillä ja takaspoilerilla.

Malli	Ilmanvastuskerroin	Nostekerroin	Hyötysuhde
Lähtötilanne	0.304	+0.306	-1.007
Spoileri ja splitteri	0.350	-0.748	2.136

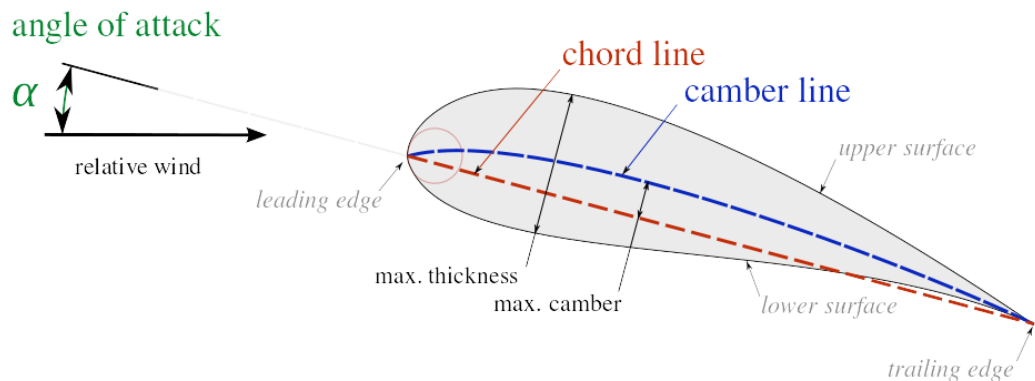
Taulukko 1. CFD-analyysistä lasketut ajoneuvon rungon aerodynaamisen suorituskvyn tunnusluvut.

Kuvasarjasta 11 nähdään, miten splitteri käyttää hyväkseen paine-eroa auton keulan edessä ja sen alla luodakseen nostetta. Nähtävillä on myös takaspoilerin vaikutus: paine auton perän päällä kasvaa ja laskee auton takana. Matalapainealue auton takana vaikuttaa myös virtaukseen auton alla sitä nopeuttaen. Toisaalta tämä matalapainealue sekä keulan edessä oleva korkeapainealue aiheuttavat vastusvoimaa, jonka suuruus kasvaa näiden lisälaitteiden myötä. Kokonaishyötysuhde on kuitenkin olennaisesti parempi laitteiden kanssa kuin ilman. Ilman lisälaitteita runko nimittäin tuottaa positiivista nostetta, ja lisäämällä splitteri ja spoileri noste muuttuu negatiiviseksi ja ilmanvastus kasvaa noin 15%. Spoilerit ja splitterit ovat siis hyvin tehokkaita lisälaitteita ainakin katuautoihin pohjautuviin kilpa-autoihin, joissa ei voida käyttää suuria etu- ja takasiipiä.

### 4.3 Kilpa-autojen siipien rakenne

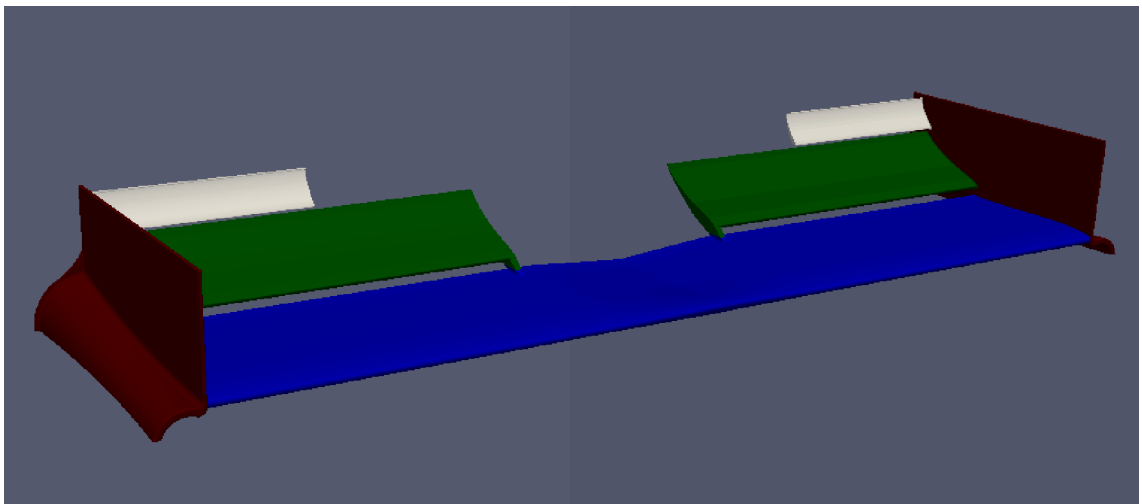
Kilpa-auton, kuten lentokoneenkin, siiven muodostaa *siipiprofiili* (eng. *airfoil*), joka on siiven poikkileikkaus sen tarkoitettuun kulkusuuntaan nähden sivusuunnassa. Profiili voi olla vakio tai muuttua siiven leveyssuunnassa. Siiven leveyttä nimitetään *kärkiväliksi* (eng. *wing span*). Siipiprofiilin itsessään määritellään kuvan 12 esittämällä muuttujilla: *hyökkäyskulma* (eng. *angle of attack*), *johtoreuna* (eng. *leading edge*), *jättöreuna* (eng. *trailing edge*), *paksuus* (eng. *thickness*), *kaarevuus* (eng. *camber*) ja *jänne* (eng. *Chord*). Lisäksi tärkeä arvo on siiven *sivusuuhde* (eng. *Aspect ratio*), joka on siiven kärkivälin ja sen jänteen välinen suhde. Siipiprofiili määrittää siiven kehittämän noste- ja vastusvoiman, ja siipiprofiilin valinta on hyvin tärkeä osa siiven suunnittelua. Eri siipiprofiileita on tutkittu ja kategorisoitu laajasti jo 1900-luvun alusta alkaen, mm.

Yhdysvaltain avaruushallinto NASA:n edeltäjän NACA:n toimesta. (McBeath 2015, s. 87-92; Katz 2005, s. 109-125)



Kuva 12. Siipiprofiili ja sen geometriaa määrittävät tekijät. (Wikimedia commons, luettu 12.12.2017)

Siipiprofiilin geometrisista tekijöistä eniten vaikutusta sen nosteeseen on kaarevuudella ja paksuudella (Katz 2005, s. 115). Kuitenkin, kaarevuutta ei voida kasvattaa mielivaltaisesti, sillä virtaus irtaantuu liian kaarevasta pinnasta ja aiheuttaa siiven sakkaamisen. Sakkaamisen välttämiseksi suurilla kaarevuuksilla ja sitä kautta nosteen lisäämiseksi kokonainen kilpa-auton etu- tai takasiipi voi koostua useasta erillisestä *siipielementistä*, jotka sijoitetaan toisiinsa nähden peräkkäin.

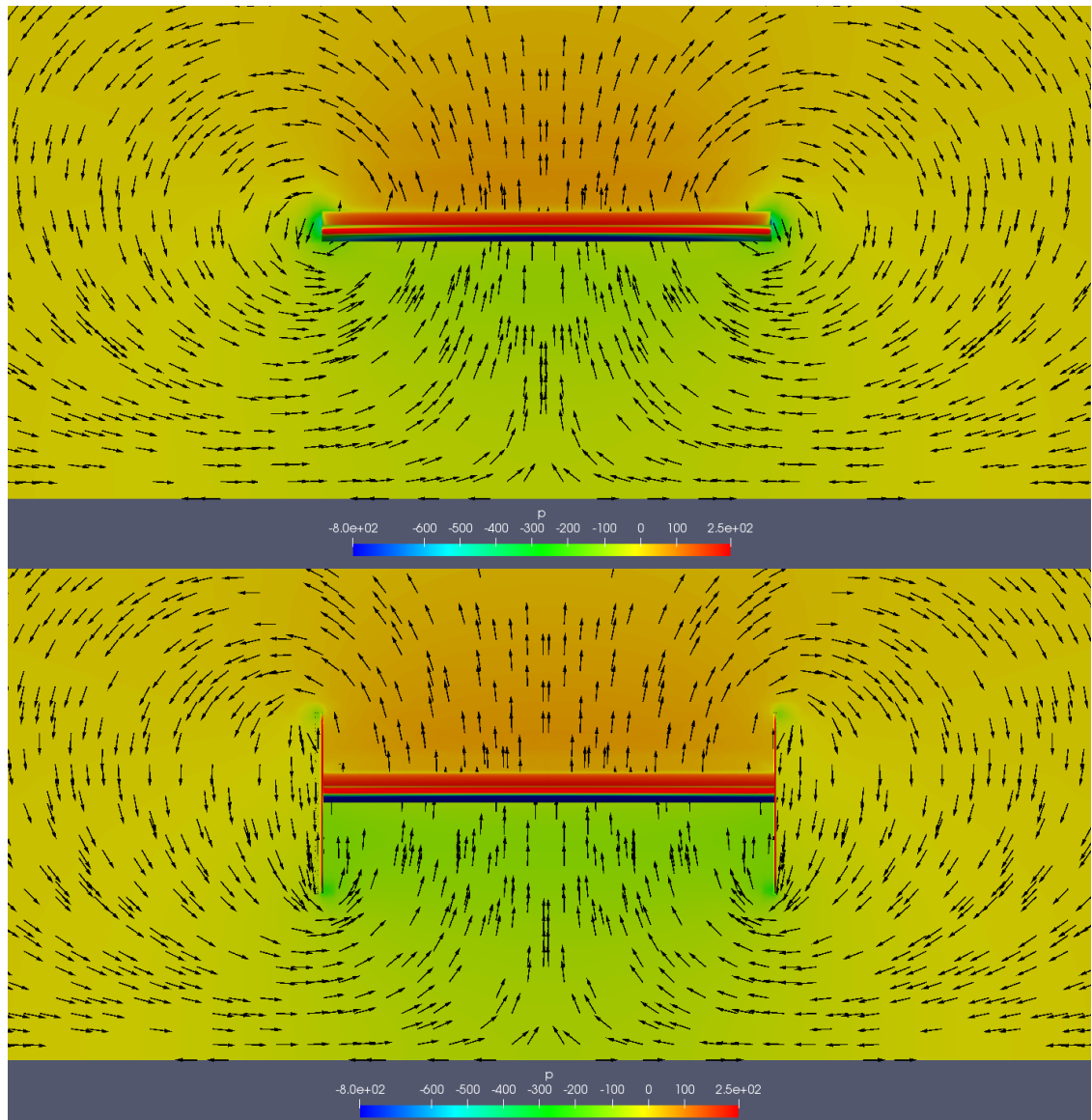


Kuva 13. Kolmielementtinen kilpa-auton etusiipi.

Kuvassa 13 on esitetty eräs kolme-elementtinen avorenkaisen auton etusiipi, jossa siiven osat on eritelty. Päätylevyt on merkattu punaisella ja siiven kolme elementtiä sinisellä, vihreällä ja valkoisella. Yleensä elementit numeroidaan edestä alkaen, mutta muitakin tapoja käytetään. Jakamalla siipi useaan elementtiin voidaan merkittävästi viivästyttää ilmavirran irtoamista siiven pinnasta, ja merkittävästi lisätä siiven tuottamaa nostevoimaa (McBeath 2015, s. 109-112; Katz 2005, s. 137-141). Elementtien määrää ja siiven muita äärimittoja tosin rajoitetaan usein eri kilpasarjojen säännöissä, esimerkiksi FIA:n F1-sarjassa ei sallita yli kaksielementtisiä takasiipiä, ja useimmat GT-luokkien autojen siivet on rajoitettu yksielementtisiksi. Enimmillään F1-autoissa etusiivessä saattoi olla jopa 7 elementtiä ja useita pieniä siivekkeitä virtauksen tarkan hallinnan saavuttamiseksi.

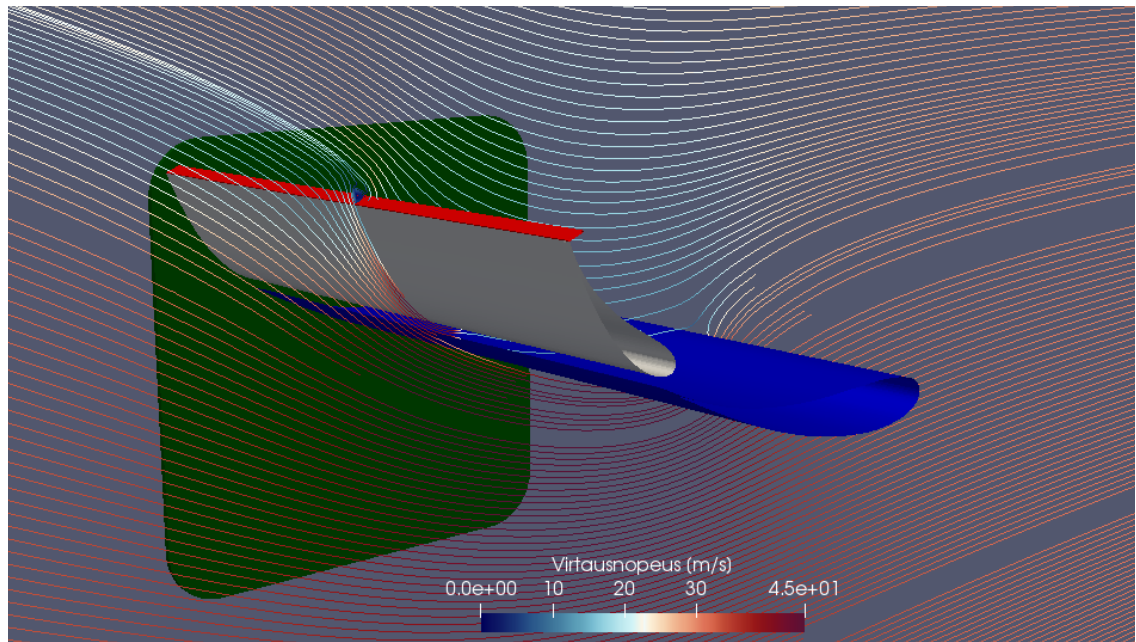
Kilpa-autojen siivissä käytetään myös usein *päätylevyjä* (eng. *endplate*), joilla pyritään hillitsemään kuvassa 14 esitettyä pyörremäistä virtausta siiven korkeapainepuolelta matalapainepuolelle, lisäten siiven nostetta ja vähentäen sen ilmanvastusta (Katz 2005, s. 140-145). Tämä pyörre pyrkii tasoittamaan paine-eroa siiven alla ja päälle, ja siten vähentää tuotettua nostetta. Edelleen, pyörteen ylläpitäminen vaatii varsin paljon työtä, joten voimakas siiven päädyn pyörre lisää myös ilmanvastusta (McBeath 2015, s. 114-117). Pyörteen vaikutuksen suuruus riippuu voimakkaasti siiven sivusuhteesta. Päätylevyillä voidaan jossain määrin hallita siiven päädyn pyörteen negatiivisia vaikutuksia, ja päätylevyjen voidaankin sanoa kasvattavan siiven efektiivistä alaa nostamalla sen sivusuhdetta (Katz 2005, s. 145).





Kuva 14. Pyörteiden muodostuminen siiven päätyihin CFD-analyysin avulla visualisoituna.

Kuvassa 14 on esitetty siiven muodostama painekenttä edestä päin kuvattuna, päätylevyjen kanssa ja ilman. Päätylevyt voimistavat alipainetta siiven alla selvästi rajoittamalla ilman virtausta siiven päältä siiven alle. Huomioinarvoista on myös päätylevyn eri puolilla vallitseva paine-ero, joka aiheuttaa merkittävän taivuttavan kuorman päätylevyihin.



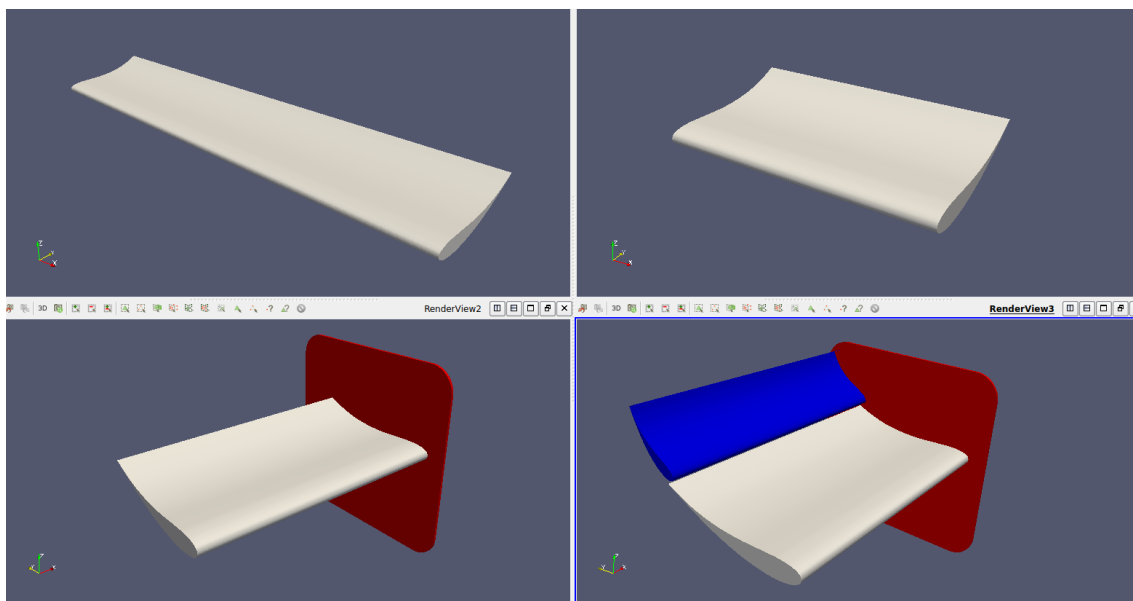
Kuva 15. Kaksielementtinen kilpa-auton takasiipi CFD-analysoituna.

Toinen kilpa-autoissa yleinen siipien lisälaite on kuvassa 15 nähtävä ns. *Gurney-läppä* (eng. *Gurney flap*), siiven jättöreunaan lisättävä, korkeapainepuolelle suunnattu pystysuora levy, jolla pyritään viivästyttämään virtauksen irtoamista siiven matalapainepuolelta. Siipielementit on kuvassa merkattu sinisellä ja valkoisella, päätylevy vihreällä ja Gurney-läppä punaisella. Virtaviivoista nähdään, miten virtaus säilyy tarttuneena siiven loppuun asti hyvin voimakkaasta kaarevuudesta ja hyökkäyskulmasta huolimatta. Tällä tavoin voidaan saavuttaa merkittävä parannus siiven tuottamaan nosteeseen, ja hyvin aggressiivisten siipien tapauksessa jopa ilmanvastuksen aleneminen! (Wang ym. 2007).

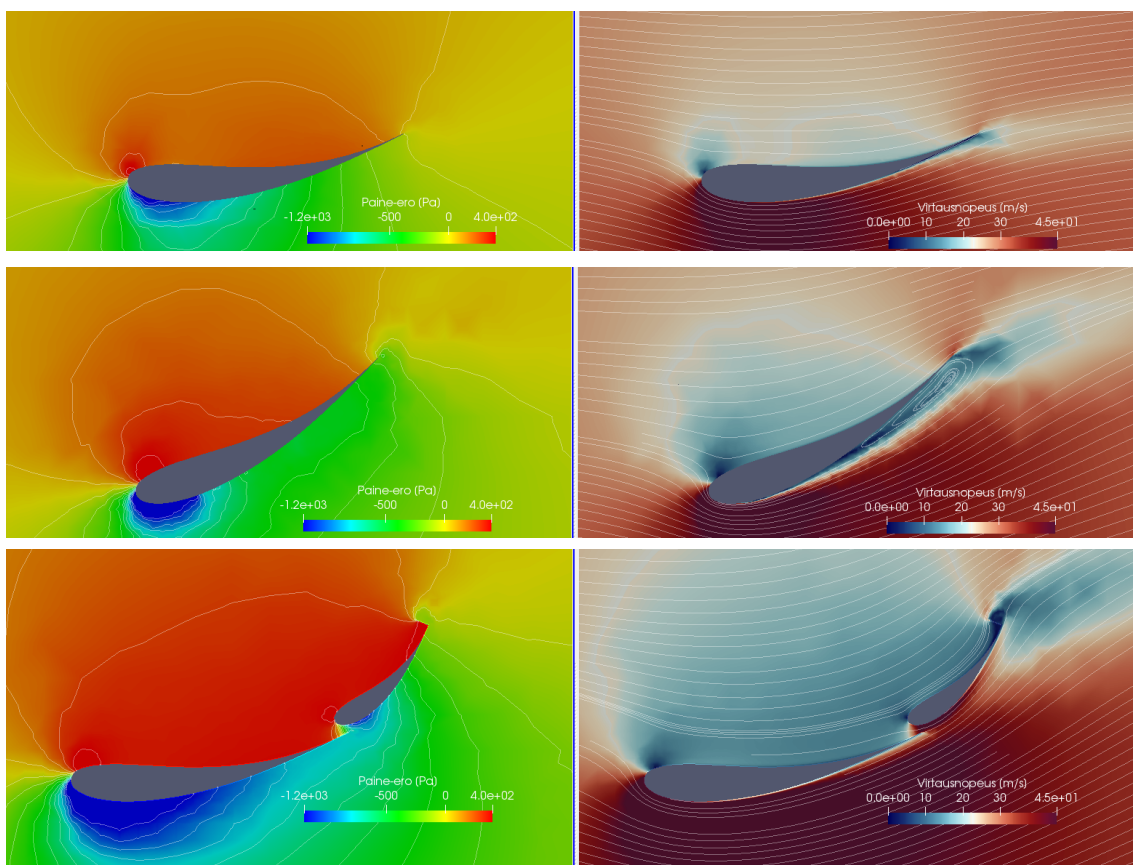
#### 4.4 Siipien toiminta kilpa-autokäytössä

Katzin (2006) mukaan kilpa-autojen siivet eroavat tavallisista lentokoneiden siivistä kolmella päätavalla: maanpinnan läheisyyden aiheuttaman voimakkaan maaefektin vuoksi, ajoneuvon oman rungon, renkaiden ja muiden osien läheisyyden takia ja kilpasarjojen määräämien, usein hyvin rajallisten maksimimittojen vuoksi. Maaefektin vaikutusta siipien toimintaan käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa, mutta rungon läheisyyden ja siiven jännevälän vaikutusta voidaan tarkastella yksinkertaisen CFD-analyysin avulla kuvassa 16 esitettyjen siipimallien avulla. Tulokset on esitetty kuvassa 17. Tarkastellaan lisäksi, mitä tapahtuu kun hyökkäyskulmaa kasvatetaan liiaksi ja

miten monielementtinen siipi tehostaa nosteen muodostumista. Noste- ja vastuskertoimet eri tilanteille on taulukoitu taulukkoon 2.



Kuva 16. CFD-analysissä käytetyt siipimallit: sivusuhte 6, sivusuhte 2, sivusuhte 2 päätylevyillä ja sivusuhte 2 kahdella elementillä ja päätylevyillä.



Kuva 17. Kolme eri siipeä samalla siipiprofiililla, kataloginimeltään GOE 652.

Kuvasarjassa 17 ylimmässä kuvassa hyökkäyskulma on 10 astetta, alemmissa kuvissa 25 astetta. Monielementtisen siiven hyökkäyskulma mitataan kaikkien elementtien yli, ensimmäisen elementin johtoreunasta viimeisen elementin jättöreunaan. Alemmista kuvista nähdään selvästi, miten liian suurella hyökkäyskulmalla siipi sakkaa voimakkaasti, mutta siiven jakaminen kahteen elementtiin estää sakkaamisen kokonaan ja voimakkaasti tehostaa alipaineen muodostumista siiven alle. Elementtien väliin jäävä rako on englanniksi nimeltään *slot gap*. Siiven päällä vallitseva korkeapaine pääsee purkautumaan tästä raosta toisen elementin alapinnalle suurella nopeudella, vähentäen virtauksen taipumusta irrota siiven pinnasta.

	Vastuskerroin	Nostekerroin	Hyötysuhde
Sivusuhte 6	0.115	1.897	16.545
Sivusuhte 2	0.160	1.370	8.580
Sivusuhte 2, päätylevyillä	0.155	1.670	10.782
Sivusuhte 2, 25° hyökkäyskulma	0.617	2.164	3.508
Sivusuhte 2, 2-elementtiä ja päätylevyt	1.089	4.670	4.290

Taulukko 2. CFD-analyysistä lasketut siipien tunnusluvut taulukoituna.

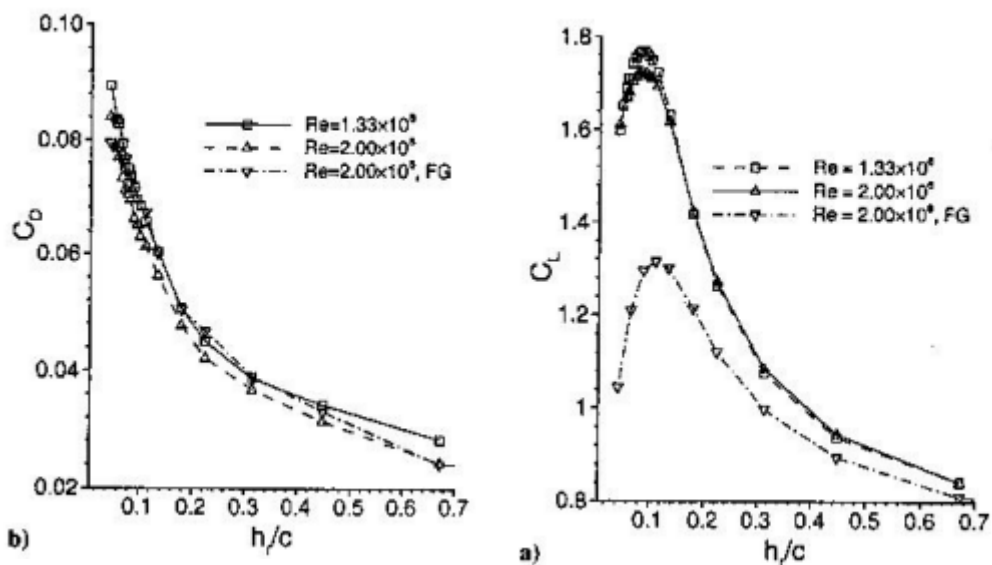
Taulukosta 2 nähdään, miten sivusuhteen rajoittaminen heikentää siiven hyötysuhdetta voimakkaasti, ja miten päätylevyjen avulla ilmiötä voidaan rajoittaa. Lisäksi nähdään, että sakkaava siipi, kuten 25° tapauksessa, ei välttämättä menetä kaikkea nostettaan välittömästi. Sakkaaminen kuitenkin heikentää hyötysuhdetta voimakkaasti, eikä siten yleensä ole toivottavaa. 2-elementtinen siipi puolestaan toimii sakkaamatta korkeallakin hyökkäyskulmassa ja kehittää suurimman vastus- ja nostekertoimen. Huomioitavaa on, että käytetyn siiven hyökkäyskulma on varsin suuri, joten parempi hyötysuhde on varmasti saavutettavissa kulmaa muuttamalla. Korkea sivusuhte ja 1 elementti tuottavat kuitenkin parhaan hyötysuhteen, mikä on yksi syy miksei lentokoneissa nähdä monielementtisiä siipiä laipparakenteita (eng. *flaps*) lukuunottamatta.

## 5. MAAEFEKTI LAITTEET

### 5.1 Maaefektin toiminta

Maaefektillä (eng. *ground effect*) tarkoitetaan yleisesti siipeä ympäröivän virtauskentän muuttumista maanpinnan läheisyyden johdosta. Maaefekti lisää merkittävästi siiven tuottamaa nostetta ja jossain määrin ilmanvastusta, siiven ajokorkeudesta riippuen (Zerihan & Zhang, 2000). Koska kilpa-autot toimivat luonnostaan hyvin lähellä maanpintaa, on maaefektin hyödyntäminen ratkaisevan tärkeä osa niiden aerodynamiikkaa, ja maaefektin käyttöä ajoneuvoissa on tutkittu järjestelmällisesti 1970-luvulta alkaen (McBeath 2015, s. 146-150; Zhang 2006).

Maaefektin avulla siiven nostekerroin voi jopa kaksinkertaistua sen nimellisarvoon nähden oikealla ajokorkeudella, tosin liian matalilla ajokorkeuksilla siipi alkaa sakata voimakkaasti, etenkin kun profiilin hyökkäyskulma on suuri (Zerihan & Zhang, 2000). Suurin nostekerroin saavutetaan, kun siiven korkeus sen pohjasta mitattuna on noin 0.1 kertaa siiven jänteen pituus (Zhang 2006). Voimakkaasti maaefektiä hyödyntävät kilpa-autot joudutaankin suunnittelemaan hyvin jäykästi jousitetuiksi jotta ajokorkeus saadaan pidettyä myös ajon aikana sopivana maaefektin toimivuuden varmistamiseksi (Katz 2005, s. 179-180).

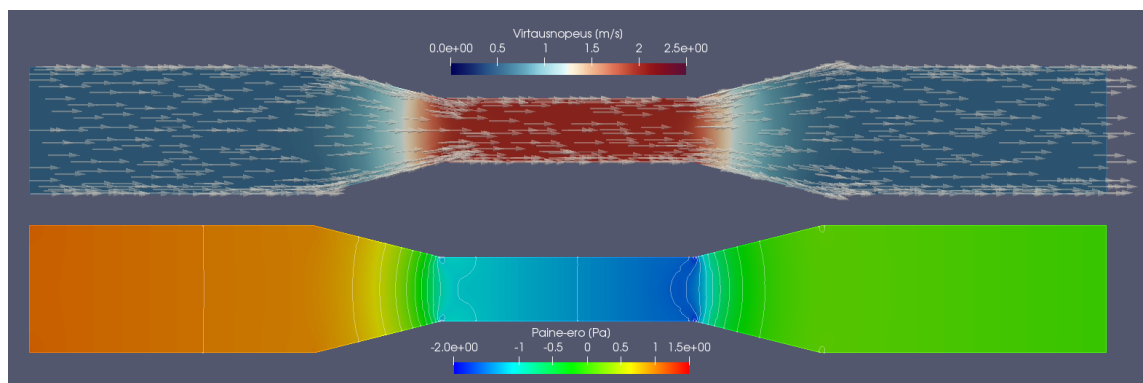


Kuva 18. Erään siiven nostekertoimien riippuvuus ajokorkeudesta.

Erään siiven kehittämien voimakertoimien riippuvuus ajokorkeudesta on esitetty kuvassa 18. Ajokorkeus on kuvattu vaaka-akselilla suhteessa siiven janteen pituuteen (eng. *height/chord*). Pystyakselilla on vasemmalla vastuskerroin ja oikealla nostekerroin. Nostevoiman maksimi saavutetaan hieman ennen sakkausta. (Zerihan & Zhang, 2000).

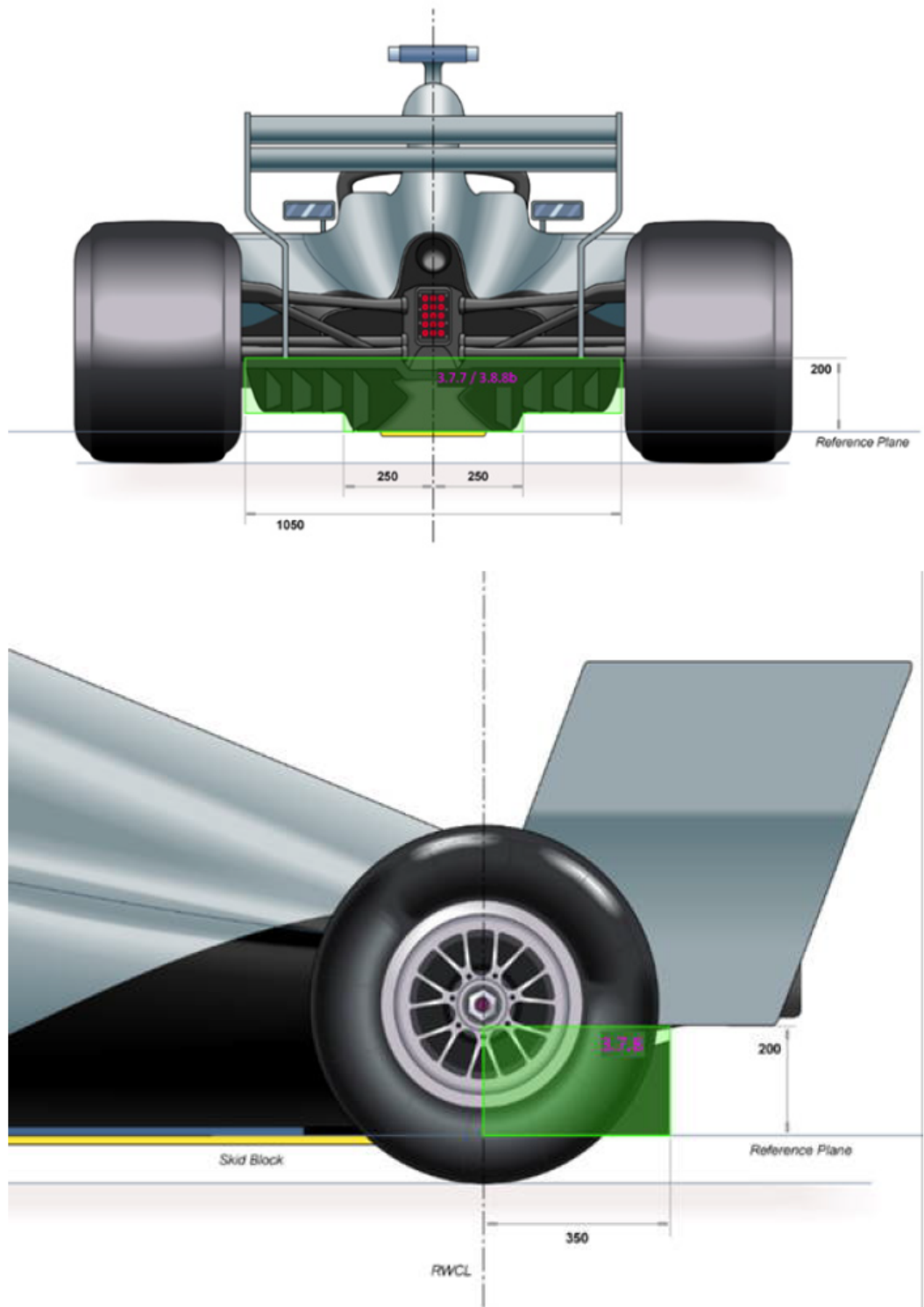
## 5.2 Varsinaiset maaefektilaitteet

Maaefektin hyödyntämiseksi kilpa-autojen rungot ja sivuponttoonit suunniteltiin siipiprofiilin muotoon, kunnes useiden sarjojen säännöt alkoivat merkittävästi rajoittaa auton pohjan geometriaa 1990-luvun puolivälistä alkaen, pakottaen autoille yleensä tasaisen pohjalevyn (McBeath 2015, s. 11-15). Esimerkiksi FIA:n F1, GT3, GTLM ja LMP -sarjoissa auton pohjan tulee olla tasainen yleensä auton taka-akselille asti, jonka jälkeen auton perällä saa olla *diffuusori* (eng. *diffuser*), joka nykyään on merkittävin aerodynaaminen laite autojen alla.



Kuva 19. Diffuusorin toiminta CFD-analyysin avulla havainnollistettuna.

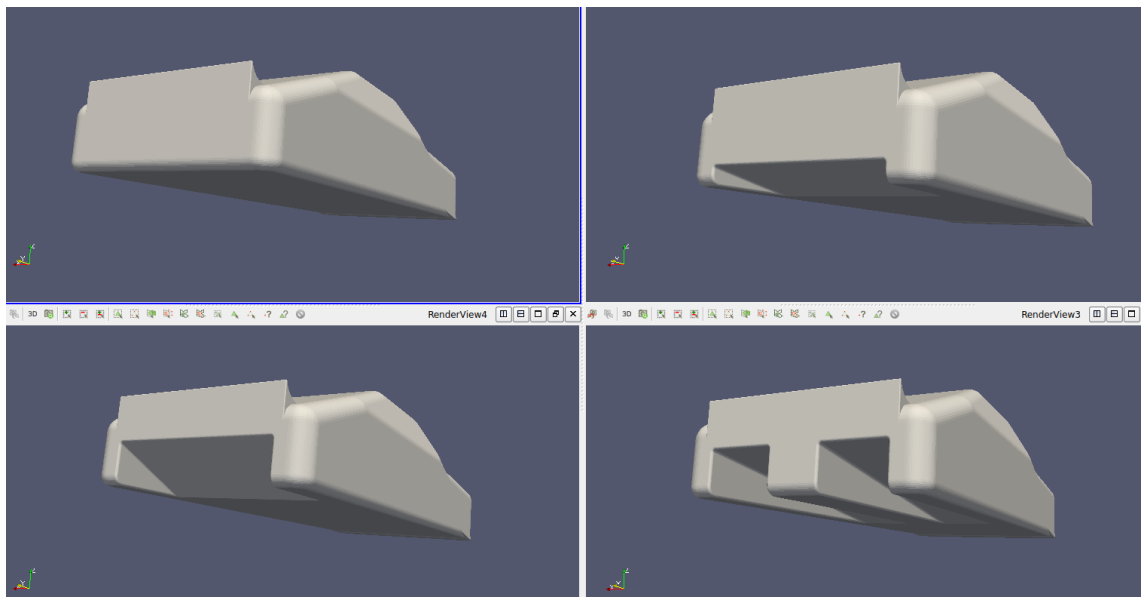
Yleisesti virtausdynamiikassa diffuusori on kuvan 19 mukainen laite, joka muuttaa virtauksen liike-energiaa paineeksi virtauskanavan poikkileikkausta muuttamalla (Zhang 2006). Kun diffuusorin läpi kulkeva massavirta on vakio, sen poikkileikkauksen muuttaminen pakottaa Bernoullin lain mukaan virtauksen nopeuden muutoksen, jolloin saadaan aikaan haluttu paineen muutos. Tätä ilmiötä hyödyntämällä voidaan auton pohjan ja maanpinnan välillä luoda merkittävästi nostetta.



Kuva 20. FIA:n F1-sarjan säännöissä sallitut difuuserin maksimitat; vihreällä merkattua aluetta lukuunottamatta auton pohjan muoto on säännöissä tarkkaan määritelty (FIA.com/regulations, luettu 06.09.2021).

Kilpa-ajoneuvojen tapauksessa auton alle voidaan luoda ympäristöä matalampi paine käyttämällä lattian ja tienpinnan väliä diffuusorin kurkkuna, ja sijoittamalla sen perään taaksepäin aukeava diffuusori. Mikäli virtaus ei sakkaa, massan säilymisen johdosta auton ja tien kapeassa välissä täytyy vallita sama massavirta kuin levenevässä diffuusorissakin. Tämä johtaa paineen laskuun auton pohjan alla, ja lattia alkaa tuottaa negatiivista nostetta suhteessa pinta-alansa ja paine-eroon ympäristön kanssa. Diffuusorin toimintaan vaikuttavat auton pohjan ja diffuusorin geometria sekä luonnollisesti ajokorkeus. (Zhang 2006; McBeath 2015, s. 148-163)

Diffuusorin toimintaa kilpa-autossa voidaan visualisoida yksinkertaistetun CFD-mallin avulla sijoittamalla jo aiemmin esiteltyyn yksinkertaistettuun spoilerilla varustettuun auton malliin erilaisia diffuusoreja, jotka on esitetty kuvassa 21. Diffuusorin tehokkuuteen vaikuttavat suoraan sen avautumiskulma, poistoaukon pinta-ala, ajokorkeus ja auton rungon muut piirteet, kuten siivet, pyörteenmuodostajat ja renkaat, joista mitään ei tässä mallissa ole yksinkertaistamisen vuoksi. Analyysin tulokset on esitetty kuvassa 22 ja taulukossa 3. Lisäksi kuvassa 23 analysoidaan tarkemmin aiemmin esitellyn 2-elementtisen siiven vaikutusta diffuusorin toimintaan.

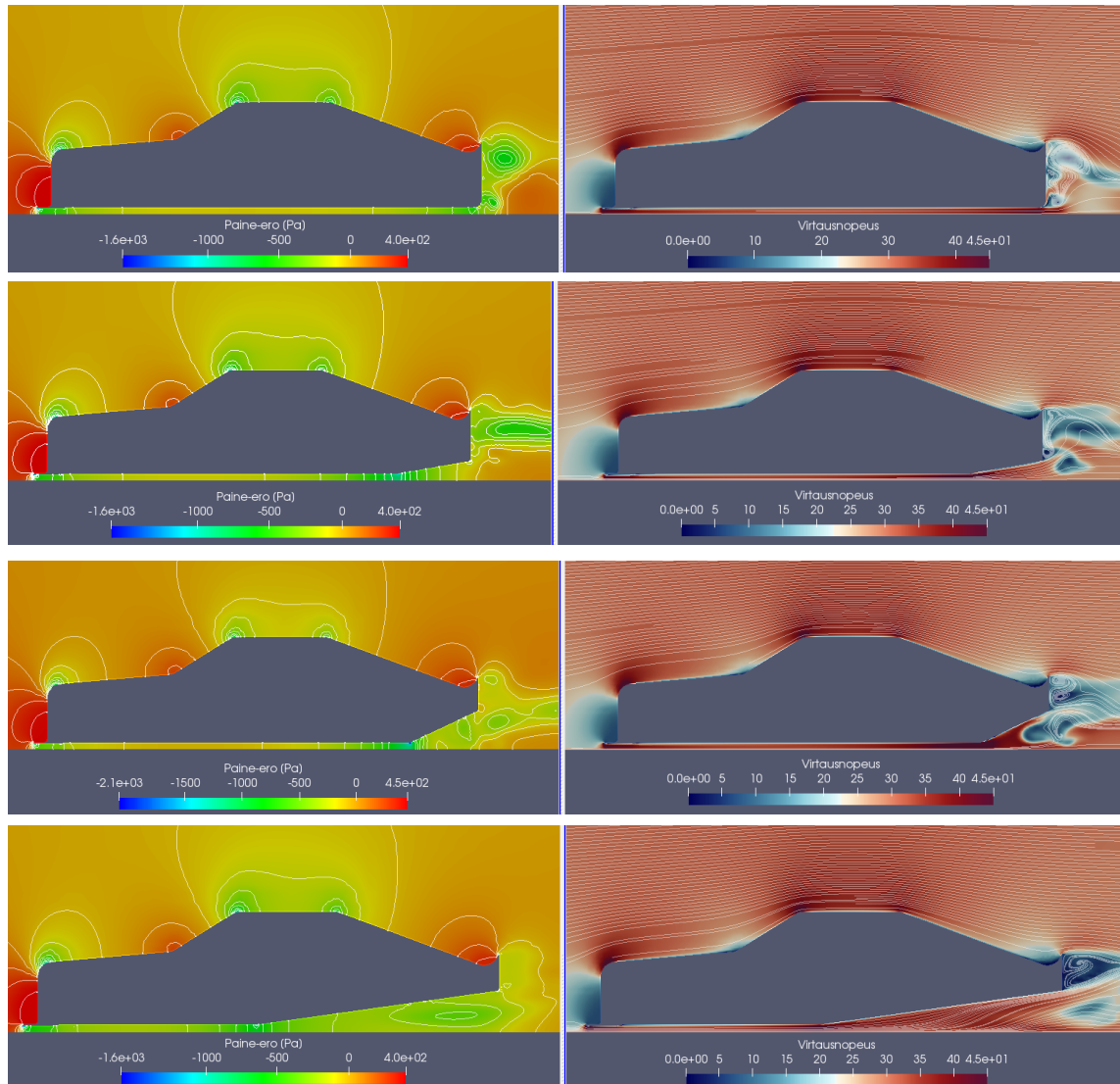


Kuva 21. CFD-analyysissä käytetyt mallit takaapäin alaviistosta kuvattuna.

Aiemmin esiteltyyn auton malliin lisättiin kuvan 21 mukaiset 10 asteen ja 25 asteen avautumiskulman diffuusorit alkamaan 50 cm auton takareunan edestä, ja lopuksi kaksi diffuusoria 15 asteen avautumiskulmaan alkamaan auton keskilinjalta. Poistoaukon korkeus on näin sama kuin 25 asteen diffuusorin. Suurin diffuusori on jaettu kahteen

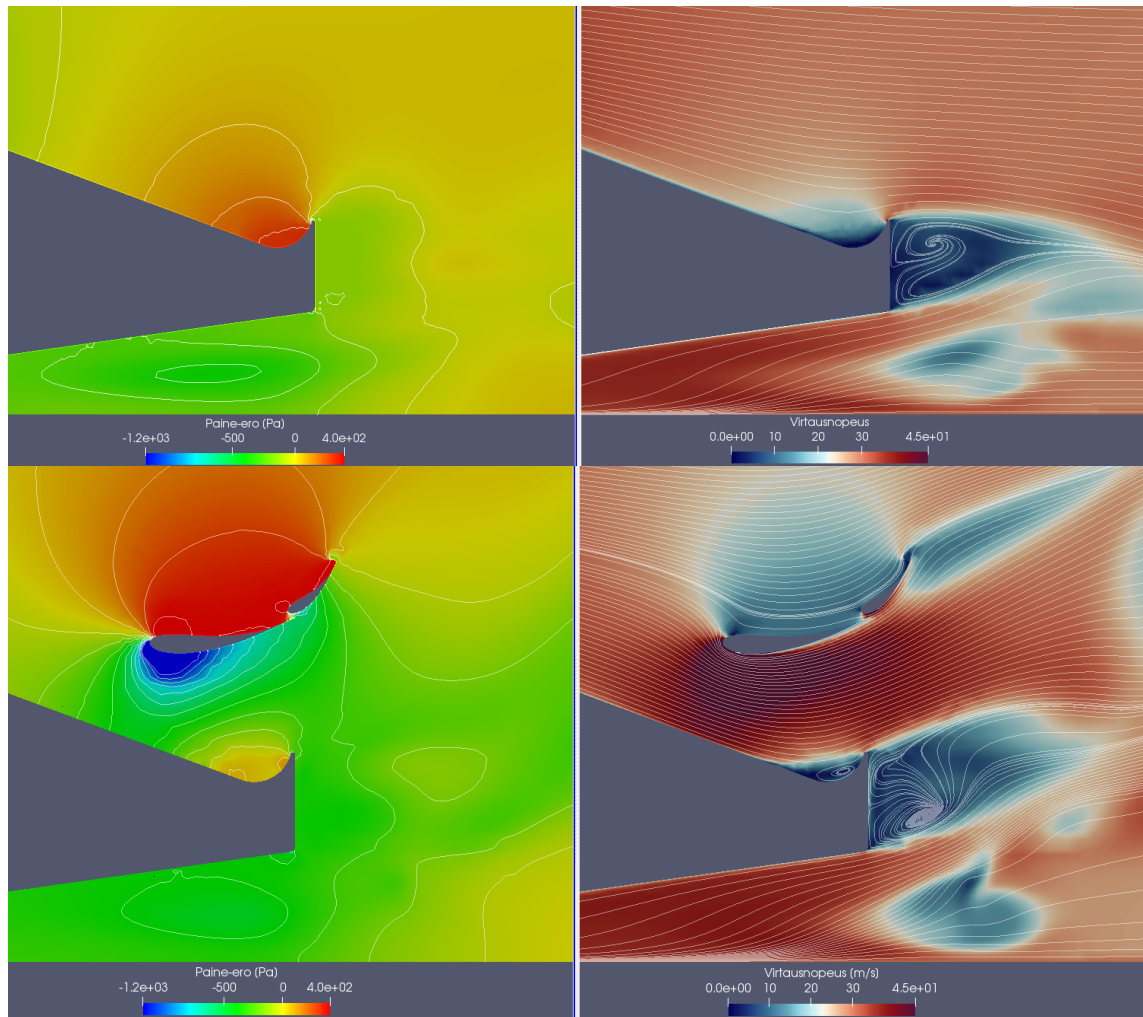


osaan, sillä käytännössä missään autossa ei voida käyttää näin suurta diffuusoria jättämättä keskilinjalle tilaa auton mekaanisille osille, kuten vaihteistolle ja takajousitukselle.



Kuva 22. Erilaiset diffuusorit CFD-analysoituna.

Diffuusorin aiheuttama paineenlasku auton alla on selvästi nähtävillä kuvasarjassa 22. Diffuusorin kulman kasvattaminen 25:n asteeseen aiheuttaa diffuusorin sakkaamisen, mutta se toimii edelleen, joskin heikommin keskilinjalta avautuva diffuusori, joka ei sakkaa lainkaan. Huomioitava on myös diffuusorin aiheuttaman matalapaineen paineeksiön sijainti. Matalapaineen huippu muodostuu diffuusorin avautumisen alkupisteeseen, joten sitä siirtämällä voidaan halutessa vaikuttaa auton nosteeksiön paikkaan.



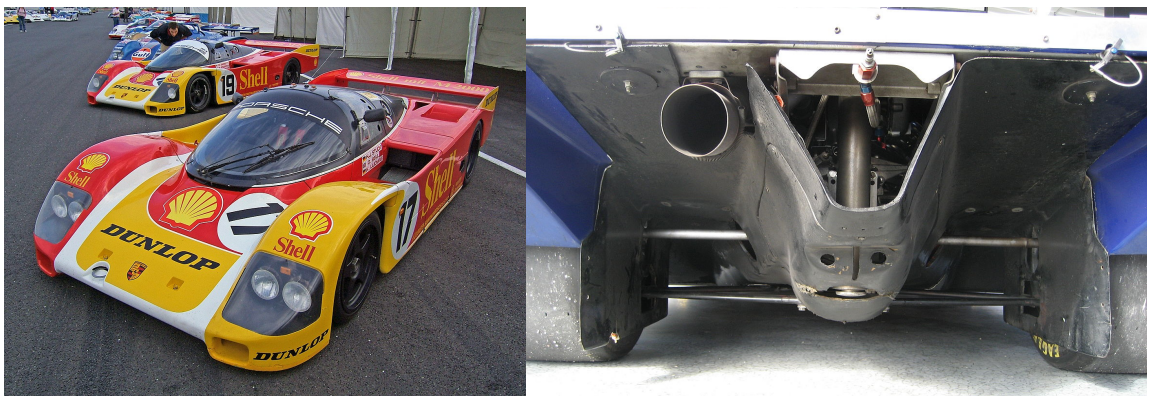
Kuva 23. Auton keskilinjalta aukeava diffuusori ja takasiiven vaikutus sen toimintaan.

Kuvassa 23 nähdään, miten takasiipi taittaa koko virtauksen suunnan ylöspäin auton takana ja nopeuttaa siten virtausta myös auton alla. Vihreällä värillä kuvattu matalapaineen alue auton alla ja takana onkin laajempi ja voimakkaampi kuin ilman siipeä. Toisaalta nähdään myös, miten spoilerin päällä vallitseva korkeapaine tasoittuu siiven alapinnan matalapaineen vaikutuksesta. Siiven tehokkuus ei siten ole yhtä hyvä kuin vapaassa virtauksessa. Useiden kilpasarjojen säännöt pakottavatkin takasiivet varsin lähelle auton runkoa.

	Vastuskerroin	Nostekerroin	Hyötysuhde
Ei diffuusoria	0.350	0.748	2.136
10 asteen diffuusori	0.331	1.533	4.633
25 asteen diffuusori	0.380	1.810	4.772
Pitkä diffuusori	0.287	1.930	6.723
Pitkä diffuusori takasiivellä	0.756	2.004	2.649
Pitkä diffuusori takasiivellä siiven tuottama noste mukaan laskettuna	0.997	3.947	3.961

Taulukko 3. CFD-analyysin tuloksista lasketut voimakertoimet.

Taulukosta 3 selviää, että diffuusori on hyvin tehokas tapa tuottaa nostetta, sillä pisintä diffuusoria käytettäessä ilmanvastus jopa *laskee* nosteen kasvaessa! Lisäksi nähdään, että sakkaavakin diffuusori toimii edelleen hyvällä hyötysuhteella. Vasta kun malliin lisätään takasiipi, ilmanvastus kasvaa merkittävästi, mutta takasiipi mukaan laskettuna tuotettu noste lähes kaksinkertaistuu. Myös rungon tuottama noste kasvaa jonkin verran takasiiven lisäämisen myötä, mikä kertoo takasiiven diffuusoria tehostavasta vaikutuksesta.



Kuva 24. 1988 Porsche 962 ja sen diffuusori takaapäin kuvattuna (Wikimedia commons, luettu 12.12.2017)

Ennen kuin säännöt pakottivat tasaiset pohjalevyt useimpiin huippusarjoihin, autojen diffuusorit saattoivat olla valtavia ja ne määrittivät jopa auton moottorin ja jousituksen suunnittelua. Yleisesti puhutaankin *maaefektitunneleista* (eng. *ground effect tunnel* tai *venturi tunnel*) kun tarkoitetaan 1980-luvun ja 1990-luvun alun kilpa-autojen, kuten kuvan 24 Porsche 962:den voimakkaasti profiloituja pohjalevyjä (McBeath 2015, s. 164-165). Kuvan auton diffuusori alkaa lähes heti eturenkaan jälkeen, ja laajenee takarenkaiden napojen yli, peittäen ylemmät tukivarret kokonaan. Porsche 962 ja sen hyvin samankaltainen edeltäjä 956 voittivat mm. Le Mansin 24 tunnin ajon 7 kertaa vuosina 1982-1994. Auto on kenties tunnetuin täysin maaefektiä varten suunniteltu kilpa-auto.

Tällaisten tunnelien toimintaperiaate on sama kuin nykyajan mukaisen tasaisen pohjalevyn ja diffuusorin. Tunneli tosin muodostaa merkittävästi suuremman ja hitaamman laajenemisen ja sallii sitä kautta huomattavasti voimakkaamman alipaineen muodostumisen. Alipaineen keskiö sijoittuu myös huomattavasti lähemmäs atuton keskilinjaa ja painopistettä, parantaen tasapainoa. Huomioitavaa on myös auton keulalla näkyvä korotettu alue, joka muodostaa tunnelille laajemman imuaukon, edelleen parantaen sen toimintaa. Nykyään tällaiset ratkaisut ovat kiellettyjä lähes kaikkialla, tosin amerikkalainen IndyCar-sarja sallii yhä tunneleiksi asti profiloidut pohjalevyt.

## 6. YHTEENVETO

Autojen aerodynamiikan merkitys on ymmärretty jo hyvin varhaisesta vaiheesta. Ensimmäiset askeleet sen kehittämiseksi tehtiinkin jo 1800-luvun puolella. Kuitenkin, vasta 1960-luvulta alkaen ymmärrettiin negatiivisen nostevoiman eli downforcen merkitys kilpa-auton suorituskyvylle. Lisäämällä tiehen suuntautuvaa voimaa auton renkailla, voidaan merkittävästi lisätä pitoa ja sitä kautta sivuttais- ja pitkittäiskiihtyvyyksiä.

Autoihin lisättiin ensin siipiä lentokoneiden tapaan, mutta pian ymmärrettiin maanpinnan aiheuttaman maaefektin vaikutus. Maaefekti tehostaa siipien toimintaa olennaisesti, ja muotoilemalla koko auton runko hyödyntämään tätä ilmiötä, voidaan saavuttaa erittäin suuria nostevoimia, ilmanvastusta juuri lisäämättä. Kilpasarjojen sääntöjä luovat tahot, kuten FIA ja ACO alkoivatkin rajoittaa autojen aerodynamiikkaa jottei autojen suorituskyky kasvaisi vaaralliselle tasolle.

Nykyään autojen aerodynamiikan kehitys on edelleen voimakasta, mutta suuria mullistuksia ei enää ole odotettavissa. Useimmat sarjat ovat säännöiltään niin tiukkoja, ettei tilaa radikaalille innovaatiolle juurikaan ole. Sen sijaan painopiste on siirtynyt sallittujen ratkaisujen, kuten siipien, splitterien, spoilereiden ja diffuusorien optimointiin. Yksittäisten komponenttien sijaan pyritäänkin kehittämään auton kokonaisuutta, runko, renkaat ja muut komponentit huomioiden. Tämä työ on hidasta ja haastavaa, mutta modernit tietokoneavusteiset laskentamenetelmät mahdollistavat jatkuvan edistyksen.

Nykyään kaikki autojen ulkoiset osat, jousitus ja usein jopa moottori ja voimansiirto suunnitellaan aerodynamiikan ehdoilla. Aerodynaamisten voimien, erityisesti nostevoiman vaikutus suorituskykyyn on niin suuri, ettei muilla kehityksen kohteilla voida ohittaa sitä. Moderni kilpa-auto onkin ennen kaikkea aerodynaaminen laite.

# LÄHDELUETTELO

Zhang, X., Toet, W., Zerihan, J., 2006. Ground Effect Aerodynamics of Race Cars. Applied Mechanics Reviews, Vol 59 (6), s. 33-48.

McBeath, S., 2015. Competition Car Aerodynamics. Dorchester UK, 320 s. ISBN978-1-845847-76-0

SAE J 1594, 2010. Vehicle Aerodynamics Terminology. Society of Automotive Engineers, Inc.: 7 s.

Shan H., Jiang L., Liu C., Love M. & Maines B., 2008. Numerical study of passive and active flow separation control over a NACA0012 airfoil. Computers & Fluids, Vol 37 (88), s. 975-992

Katz, J., 2005. Race car aerodynamics: Designing for speed. Cambridge MA USA, Robert Bentley Inc, 308 s. ISBN 978-0-8376-0142-7

Hucho WH., 1987, Introduction to automobile aerodynamics. Teoksessa: Hucho WH (toim) Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering, Lontoo: Butterworth-Heinemann, s. 1-46. ISBN 0-408-01422-9

Milliken, W. F. & Milliken, D. L., 1995. Race Car Vehicle Dynamics. Warrendale PA USA, Society of Automotive Engineers, Inc., 890 s. ISBN 1-56091-526-9

Leduc, G., 2009. Longer and Heavier Vehicles, An overview of technical aspects. Luxemburg: JRC Scientific and Technical Reports, 49 s. ISBN 978-92-79-12983-4

Katz, J., 2006. Aerodynamics of Race Cars. Annual Review of Fluid Mechanics, Vol 38:27-63, s. 27-63

Wang, J., Li, Y., & Choi K.-S., 2007. Gurney Flap - Lift enhancement, mechanisms and applications. Progress in Aerospace Sciences, Vol 44 (2008), s. 22-47

Zerihan, J. & Zhang X., 2000. Aerodynamics of a Single Element Wing in Ground Effect. Journal of Aircraft, Col 37 (6), s. 1058-1064